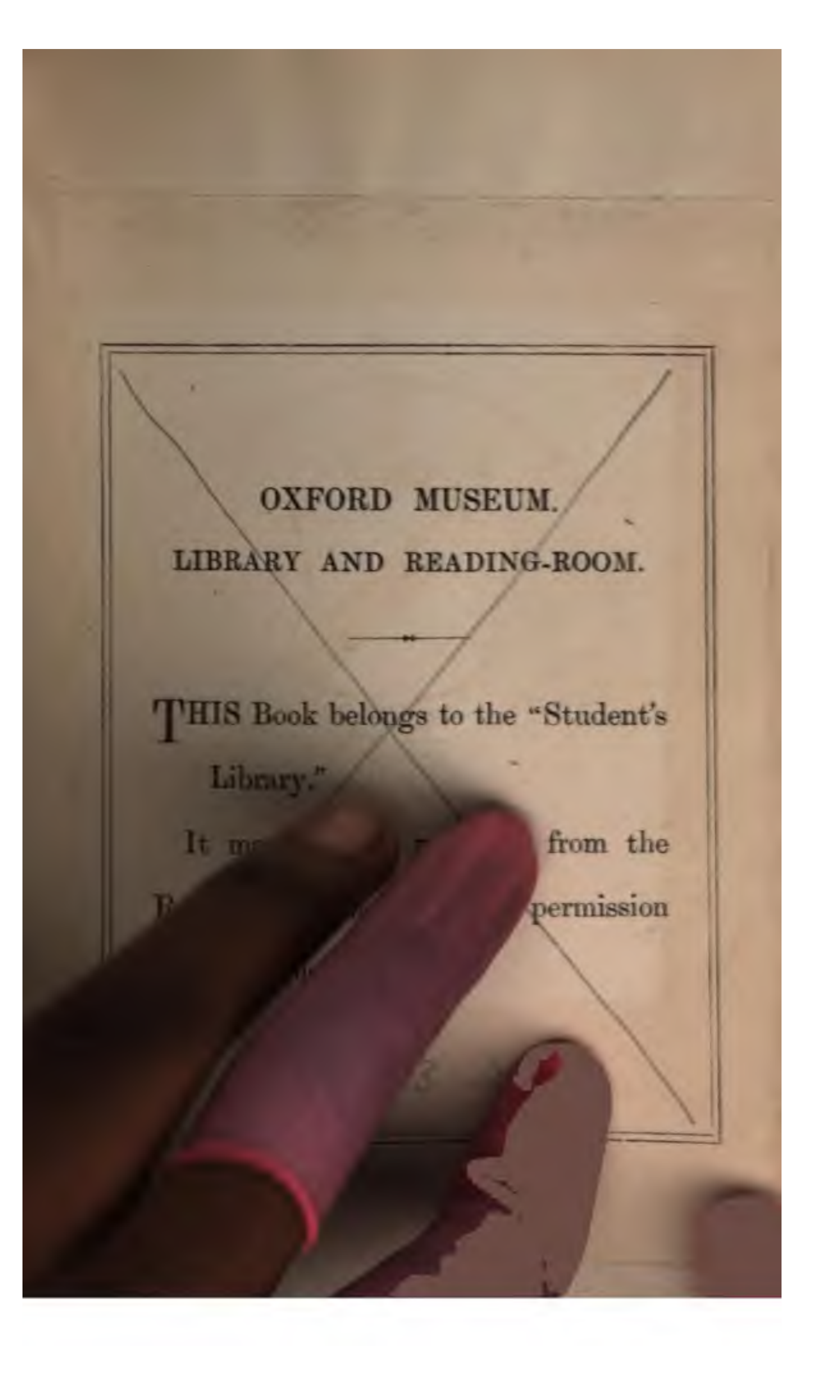



600048694.
C.6. D. 7.
E. BIBL. RADCL.
18603



COURS ÉLÉMENTAIRE

DE MÉCANIQUE

Corbeil. — Typ. et stér. de Crété.

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE

MÉCANIQUE

THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

PAR

M. CH. DELAUNAY,

MEMBRE DE L'INSTITUT (ACADÉMIE DES SCIENCES),
INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES, PROFESSEUR A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
ET A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

Cinquième Édition.

PARIS

VICTOR MASSON ET FILS, PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE | GARNIER FRÈRES, RUE DES SAINTS PÈRES, 6

MDCCCLXII



PROGRAMME

DU COURS DE MÉCANIQUE DES LYCÉES

Classe de rhétorique. — Section des sciences.

LES ÉDITEURS ONT INDIQUÉ, PAR DES NUMÉROS DE RENVOI, LES PAGES OU SONT TRAITÉES LES MATIÈRES DE CE PROGRAMME.

Du temps et de sa mesure. Unités adoptées (7). — Du pendule. Résultats des observations de Galilée (121).

Du mouvement. — Il est absolu ou relatif (5).

Du mouvement uniforme. Vitesse (7).

Du mouvement varié en général. — Mouvement accéléré, retardé, périodique. — Vitesse (8).

Mouvement uniformément accéléré. — Lois de ce mouvement. — La chute des graves dans le vide offre un exemple du mouvement uniformément accéléré (103). — Machine d'Atwood (100). — Appareil à indications continues (110).

Mouvement uniformément retardé (108).

Mouvement circulaire ou de rotation. — Vitesse angulaire (8).

Composition des mouvements. — Indépendance des mouvements simultanés, constatée par l'observation.

Composition des chemins parcourus et des vitesses (129).

Transformation de mouvement.

Du plan incliné (71). — Rapport des espaces parcourus dans le sens du plan, aux espaces parcourus dans le sens de sa base et de sa hauteur (83).

Des poulies. — Poulie fixe. — Poulie mobile dans le cas où les deux brins de la corde sont parallèles (47). — Poulies mouflées (48). — Rapport des chemins parcourus par la main de l'homme et par le fardeau (81).

Du treuil. — Treuil des carriers. — Treuil des puits (49, 51).

— Rapports des chemins parcourus par les chevilles ou par la manivelle, au chemin parcouru par le fardeau.

Des engrenages. — Description sommaire. — Tracé pratique. — Rapport des nombres de tours des roues et des pignons (57).

Des courroies et cordes sans fin (54).

De la vis et de son écrou. — Rapport des chemins parcourus par l'extrémité du levier et par l'écrou ou la vis, dans le sens de l'axe (86).

Des forces et de leurs effets. — Loi de l'inertie. — Forces. — Effets des forces. — Conditions de l'égalité de deux forces. — Égalité de l'action et de la réaction (10).

Comparaison des forces aux poids, à l'aide de dynamomètres. — Le kilogramme peut être pris pour unité de force (13).

Principe de la proportionnalité des forces aux vitesses. — Deux forces constantes appliquées successivement à un même point matériel, partant du repos ou animé d'une vitesse initiale de même direction que les forces, sont entre elles comme les accélérations qu'elles produisent (115).

Conséquence relative au cas où l'une des forces est le poids même du mobile. — Définition de la masse (116).

Relation entre les forces constantes, les masses et les accélérations (117).

Travail d'une force constante, agissant sur un point matériel qui se meut en ligne droite dans la direction de la force (92).

Cas d'une force constante, appliquée tangentiellement à la circonférence d'une roue.

Unités de travail. — Kilogrammètres (94). — Force de cheval-vapeur (307).

Composition de deux forces appliquées à un même point matériel, déduite de la composition des vitesses.

Les distances d'un point de la résultante à deux composantes sont en raison inverse des intensités de ces composantes. — Conséquence pour la composition des forces parallèles.

Extension des propositions qui précèdent aux cas de plusieurs forces concourantes ou parallèles (16 à 27).

Conditions de l'équilibre d'un point matériel. Ces conditions sont indépendantes de l'état de mouvement ou de repos du point considéré.

Centre des forces parallèles. — Centre de gravité. — Cas où le

corps a un plan, un axe de symétrie, un centre de figure. — Sphère. — Parallélipipède. — Méthode pratique pour déterminer le centre de gravité des corps solides (28 à 33).

Du mouvement uniforme des machines. — Énoncé du principe de la transmission du travail dans ce cas (96).

Le travail moteur est toujours plus grand que l'effet utile (183). — Impossibilité du mouvement perpétuel et de la multiplication du travail moteur (314).

Rendement d'une machine. — C'est le rapport du travail ou effet utile transmis au travail moteur dépensé. — Il constitue la valeur industrielle de l'appareil. — Il est toujours inférieur à l'unité (185).

Énoncé des lois expérimentales du frottement, 1° à l'instant du départ ; 2° pendant le mouvement (165).

Application des principes et des notions précédentes au plan incliné, au levier, au treuil, à la poulie simple ou mouflée, à la vis. — Usage de ces machines (80).

Écoulement des liquides. — Expérience et règle de Torricelli. — Contraction des veines (417). — Formules pratiques pour les cas les plus usuels du jaugeage des cours d'eau (460).

Notions sur les moteurs ou récepteurs hydrauliques. Force ou travail absolu d'un cours d'eau. Il y a pour tous les récepteurs une vitesse relative au maximum d'effet (543).

Anciennes roues à palettes planes, recevant l'eau en dessous. — Roues à aubes courbes. — Roues à aubes planes emboîtées dans des coursiers circulaires. Roues à augets recevant l'eau à la partie supérieure. Rendement de ces diverses roues (547).

Des pompes. — Soupapes. — Pistons. — Pompes élévatoires. — Pompes aspirantes et élévatoires. — Pompes aspirantes et foulantes. — Causes de pertes de travail moteur inhérentes aux pompes (503).

Vis d'Archimède (490). — Roue à tympan (497). — Résultats d'expériences sur leur rendement.

Moulins à vent (606). — Notions succinctes sur la monture du blé (211).

Résultats d'expérience sur la force motrice et le travail utile développé par les moteurs animés (308).

Machines à vapeur. — Description sommaire des principaux

systèmes en usage. — Action de la vapeur. — Effets de la détente, de la condensation. — Description et effets utiles : 1° de la machine à basse pression de Watt ; 2° de la machine à détente et à condensation, à un ou deux cylindres ; 3° des machines à haute pression sans détente ni condensation. — Quantités de charbon brûlées par force de cheval dans ces diverses machines (625 à 682).

Des machines locomotives (687).

COURS ÉLÉMENTAIRE

DE MÉCANIQUE

THÉORIQUE ET APPLIQUÉE.

INTRODUCTION.

§ 1. **La Mécanique** est la science des *forces* et du *mouvement*. Exposer les principes de cette science, et les appliquer à l'étude des machines et des divers phénomènes purement mécaniques que nous observons autour de nous, tel est l'objet de cet ouvrage.

Nous allons d'abord rappeler en peu de mots les propriétés générales des corps, car il faudra que nous les ayons constamment présentes à l'esprit.

§ 2. **Divisibilité.** — La matière, telle que nous la rencontrons dans la nature, jouit à un très-haut degré de la divisibilité. Tous les corps peuvent être divisés en parties extrêmement fines; chacune de ces parties peut être divisée à son tour en plusieurs autres. Mais, quoiqu'on puisse toujours concevoir que les plus petites parties qu'on a obtenues soient encore subdivisées, on ne doit pas regarder la matière comme étant divisible à l'infini. On a, au contraire, de fortes raisons de croire que les corps sont formés de la réunion d'une multitude de corpuscules non susceptibles d'être divisés.

Ces corpuscules indivisibles sont ce que l'on nomme des *atomes*.

Les dimensions des atomes doivent être excessivement faibles : on s'en fera une idée en pensant que certains animaux sont tellement petits, qu'il faut employer de puissants microscopes pour les apercevoir, et que cependant ils ont des organes qui doivent être composés d'un très-grand nombre d'atomes.

Les expressions de *molécules* et de *particules* sont employées pour désigner des parties très-petites des corps, mais dont chacune peut renfermer un grand nombre d'atomes.

§ 3. **Porosité.** — Les molécules d'un corps ne se touchent pas : elles sont à une certaine distance les unes des autres, et l'on nomme *pores* les intervalles, vides de matière, qui existent entre elles. Les corps les plus compactes en apparence ne sont pas dépourvus de pores. Les académiciens de Florence, en 1661, ayant rempli d'eau une sphère d'or creuse, et ayant fortement comprimé cette eau, la virent suinter sur toute la surface du métal : l'eau avait traversé les pores de l'or. La porosité ne peut pas être mise en évidence de cette manière pour tous les corps : ainsi le verre est imperméable aux liquides. Mais les changements de volume qui accompagnent toujours les changements de température, ne peuvent s'expliquer qu'en admettant que les molécules s'éloignent ou se rapprochent les unes des autres, suivant que la température augmente ou diminue ; il en résulte nécessairement que, dans aucun corps de la nature, les molécules ne sont en contact.

§ 4. **États des corps.** — Tous les corps sont susceptibles de prendre trois états différents : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Un des corps les plus répandus dans la nature, l'eau, se montre à nous habituellement à l'état liquide ; elle passe à l'état solide, lorsqu'elle se change en glace ; elle passe à l'état gazeux, lorsqu'elle se transforme en vapeur. Un grand nombre d'autres corps ont été obtenus sous ces trois états, et l'analogie a conduit à admettre qu'il en serait de même de tous les corps, si l'on pouvait les soumettre à des moyens suffisamment énergiques. A chaque instant de nouveaux faits viennent confirmer ces idées adoptées par les physiciens ; si quelques doutes pouvaient encore subsister, ils seraient complétement levés par les belles expériences de M. Despretz, dans lesquelles il est parvenu à fondre et à volatiliser le charbon, le corps le plus réfractaire que l'on connaisse.

§ 5. **Corps solides.** — Dans les corps solides les molécules ont des positions déterminées les unes par rapport aux autres ; si l'on cherche à les déranger, à déformer le corps, on éprouve une certaine résistance. Cependant l'effort qu'on exerce déplace réellement les molécules, et produit un changement de forme qui est plus ou moins sensible suivant les cas. Un faible effort, appliqué à un barreau mince d'acier, ou à une lame de verre, les fléchira un peu, Si cet effort cesse, le barreau d'acier et la lame de verre reprendront la forme qu'ils avaient précédemment. Cette propriété qu'ont les corps solides de revenir à leur forme primitive, lorsqu'ils sont soustraits à l'action de l'effort qui les avait déformés, constitue ce qu'on appelle l'*élasticité*. Si l'ef-

fort appliqué au corps est trop grand, ce corps pourra se briser, ou bien il se déformera tellement, qu'il ne pourra plus reprendre exactement sa forme primitive lorsque l'effort cessera : on dit alors qu'on a dépassé la *limite de l'élasticité*. Tous les corps solides sont élastiques, mais à des degrés très-différents. Il en est qui le sont tellement peu, qu'il est difficile de leur appliquer un effort assez faible pour ne pas dépasser la limite dont on vient de parler, et qu'on peut les regarder comme étant complétement dépourvus d'élasticité : tel est, par exemple, le plomb. D'autres, au contraire, sont très-élastiques, tels que l'acier, le caoutchouc.

§ 6. **Liquides, ou fluides incompressibles.** — Dans les liquides et les gaz, les molécules sont extrêmement mobiles les unes par rapport aux autres ; le moindre effort les déplace. Cette propriété fait qu'on les confond ensemble sous le nom de *fluides*.

Si l'on comprime un liquide dans un vase fermé, on éprouve une très-grande résistance, et l'on a peine à reconnaître une légère diminution dans le volume du liquide. Cette diminution est tellement faible, qu'on a douté pendant longtemps qu'elle existât réellement : aussi a-t-on désigné les liquides sous le nom de *fluides incompressibles*. Nous conserverons cette idée de l'incompressibilité des liquides, quoiqu'elle ait été démontrée inexacte, parce qu'il ne peut pas en résulter d'erreur appréciable dans les applications.

§ 7. **Gaz, ou fluides élastiques.** — Si l'on éprouve une très-grande difficulté à diminuer le volume d'un liquide d'une quantité insignifiante, par la compression, il n'en est pas de même d'un gaz. Un faible effort suffit pour comprimer, d'une manière très-sensible, un gaz contenu dans une enveloppe fermée. Une vessie pleine d'air, et dont l'ouverture a été hermétiquement fermée, diminue visiblement de volume lorsqu'on la serre entre les deux mains. Si, dans un tube de verre fermé par un bout, on introduit un piston capable de remplir complétement l'ouverture du tube, l'air contenu à l'intérieur ne trouvera pas d'issue pour s'échapper, lorsqu'on enfoncera le piston dans le tube : en exerçant une pression sur la tige du piston, on verra le volume de cet air diminuer de plus en plus, et l'on pourra ainsi le réduire à une faible fraction de ce qu'il était primitivement. Lorsque ensuite on abandonnera le piston, l'air le repoussera jusque vers l'extrémité du tube en reprenant son premier volume. L'air est donc éminemment compressible et élastique. Il en est de même

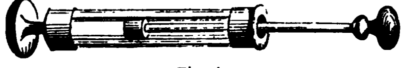


Fig. 1.

de tous les gaz, qui, pour cette raison, ont reçu le nom de *fluides élastiques*.

Lorsque l'air est fortement comprimé, comme dans l'expérience qu'on vient d'indiquer, sa température s'élève beaucoup, et si l'on a mis un peu d'amadou sur la face intérieure du piston, il est assez échauffé pour prendre feu. C'est pour cela que l'appareil représenté par la figure 1 se nomme *briquet pneumatique*, ou *briquet à air*.

Un litre d'eau étant réduit en vapeur, par l'ébullition, dans un vase ouvert, produit 1696 litres de vapeur, c'est-à-dire que cette vapeur serait capable de remplir un cube dont le côté serait de près de 12 décimètres (un cube de 12 décimètres de côté contient 1 728 litres). Si la masse d'eau avait primitivement la forme d'un cube, son côté aurait été d'un décimètre : on peut concevoir que, dans le passage de l'état liquide à l'état gazeux, les molécules de l'eau se soient simplement éloignées les unes des autres, en conservant leurs dispositions relatives ; et puisque le côté du cube doit devenir ainsi de près de 12 décimètres, il en résulte que, dans la vapeur d'eau, les molécules sont près de douze fois plus éloignées les unes des autres que dans l'eau. On voit donc que les dimensions de chaque molécule doivent être très-petites relativement aux distances qui les séparent. Il en est de même pour tous les corps gazeux.

PREMIÈRE PARTIE.

PRINCIPES GÉNÉRAUX
DE LA MÉCANIQUE.

PREMIÈRES NOTIONS SUR LE MOUVEMENT.

§ 8. Lorsqu'un corps occupe successivement différentes positions dans l'espace, on dit qu'il est en *mouvement*. Une bille qui roule sur le sol, un cheval qui marche sur une route, un bateau qui descend le courant d'une rivière, sont des corps en mouvement.

Nous ne pouvons reconnaître le changement de position de la bille, du cheval, du bateau, qu'en les comparant à des objets voisins qui nous servent de points de repère : ce seront, par exemple, les aspérités du sol, les sinuosités de la route et de la rivière, ou les arbres plantés sur leurs bords. Notre propre corps nous sert souvent de point de repère, pour reconnaître le mouvement des corps qui sont dans notre voisinage.

Lorsque nous n'avons aucun terme de comparaison pour juger du mouvement d'un corps, nous le croyons immobile. C'est ainsi que, si nous sommes dans le salon d'un bateau à vapeur qui marche sur une rivière, et que des stores abaissés sur les fenêtres nous ôtent la vue des objets extérieurs, tout ce qui nous entoure nous semble immobile : cette idée d'immobilité se fixe tellement dans notre esprit, que si nous remontons sur le pont, la première impression que nous éprouvons, c'est de croire que les bords de la rivière, les arbres, les maisons, sont en mouvement : et ce n'est qu'en faisant un effort sur nous-mêmes que nous pouvons revenir à l'idée de l'immobilité des arbres et des maisons, et du mouvement du bateau avec tout ce qu'il porte.

Si les points de repère à l'aide desquels nous jugeons qu'un corps se déplace sont eux-mêmes en mouvement, le mouvement de ce corps ne sera que relatif. Tel sera, par exemple, le mouvement d'une bille que nous verrons rouler sur le pont d'un bateau en marche. Si nous comparions cette bille aux points fixes qui existent sur les bords de la rivière, nous lui trouverions un mouvement tout différent. Il pourrait même se faire qu'elle fût en repos, si elle avait été lancée de l'avant à l'arrière du bateau, avec une telle vitesse qu'elle restât toujours en face des mêmes

points des rives : elle serait alors comme si le bateau glissait sous elle sans l'entraîner.

Tous les mouvements que nous observons autour de nous ne sont que des mouvements relatifs. En effet, la terre est en mouvement autour du soleil, et décrit, en un an, à peu près une circonférence de cercle dont le rayon est de 150 millions de kilomètres. Elle est encore animée d'autres mouvements ; mais celui-là nous suffit pour dire qu'aucun des points de repère que nous prenons sur sa surface n'est immobile. Cependant, dans l'étude des machines et des divers phénomènes mécaniques qui se passent sur la terre, nous pourrons presque toujours considérer les mouvements dont nous parlerons comme des mouvements absolus. Dans la plupart des cas, les choses se passent de la même manière que si la terre était absolument fixe.

§ 9. Lorsqu'on parle du mouvement d'un corps, on fait souvent abstraction de ses dimensions, pour ne s'occuper que d'un de ses points, dans lequel on imagine que toute sa matière est condensée. De cette manière, en se représentant par la pensée la suite des positions que le corps a occupées, on a l'idée d'une ligne, droite ou courbe, qui a été décrite par ce corps et qu'on nomme sa *trajectoire*. C'est ainsi que, quand on dit qu'un boulet lancé obliquement décrit une ligne courbe, on ne pense qu'au centre de ce boulet. Il n'y a qu'un instant, nous avons dit que la terre décrit à peu près une circonférence de cercle autour du soleil : nous avons fait abstraction des dimensions de la terre, et nous avons regardé toute sa matière comme concentrée en son centre.

Le mouvement d'un corps est *rectiligne* ou *curviligne*, suivant que la ligne qu'il décrit, ou sa trajectoire, est une ligne droite ou une ligne courbe. Les mouvements curvilignes se distinguent les uns des autres par la nature de la ligne courbe qui est décrite : le mouvement est *circulaire*, lorsque la trajectoire est une circonférence de cercle ; *parabolique*, lorsque la trajectoire est une parabole.

§ 10. Le mouvement d'un corps ne serait qu'imparfaitement connu, si l'on se contentait d'observer la forme de la ligne que ce corps décrit : il faut encore examiner le mouvement sous le rapport du temps que le corps met à parcourir les diverses portions de cette ligne.

Les instruments qui servent à mesurer le temps sont connus de tout le monde : ce sont les horloges et les montres. Mais la véritable mesure du temps réside dans les phénomènes astronomiques. Ces phénomènes déterminent des intervalles de temps successifs, égaux entre eux, qu'on appelle des jours. Les horloges et

les montres n'ont pas d'autre objet que de diviser le jour en un grand nombre de parties égales, et d'indiquer à un instant quelconque, à l'aide d'aiguilles se mouvant sur un cadran, le nombre de ces parties qui se sont écoulées depuis le commencement de la journée. Le jour se divise en 24 heures; chaque heure se subdivise en 60 minutes, et chaque minute en 60 secondes. En sorte que l'heure se compose de 3 600 secondes, et le jour de 86 400 secondes.

Pour connaître complétement le mouvement d'un corps, on devra observer, par exemple, le chemin qu'il parcourt sur sa trajectoire pendant une seconde; puis celui qu'il parcourt pendant une deuxième seconde; ensuite pendant une troisième seconde; et ainsi de suite, pendant toute la durée du mouvement.

§ 11. **Mouvement uniforme, vitesse.** — Si les chemins parcourus pendant des intervalles de temps égaux successifs sont égaux entre eux, et qu'il en soit ainsi, quels que soient ces intervalles de temps, des minutes, des secondes, des quarts de seconde, etc., le mouvement sera *uniforme*. Il est essentiel de faire attention à la condition que les chemins parcourus pendant des intervalles de temps égaux successifs soient égaux entre eux, *quels que soient ces intervalles de temps* : si, par exemple, on trouvait que les chemins parcourus pendant des secondes successives sont égaux entre eux, mais que pendant la première demi-seconde, le chemin parcouru soit plus grand que pendant la deuxième demi-seconde, le mouvement ne serait pas uniforme. Ainsi l'aiguille des secondes d'une montre parcourt des divisions égales dans les secondes successives; mais après avoir parcouru très-rapidement une des divisions, elle s'arrête un certain temps, puis elle parcourt la division suivante, s'arrête de nouveau, et ainsi de suite : son mouvement n'est pas uniforme.

En comparant divers mouvements uniformes, on reconnaît qu'ils diffèrent les uns des autres par le degré plus ou moins grand de rapidité ou de lenteur : ainsi un convoi de wagons sur un chemin de fer a un mouvement plus rapide qu'un bateau à vapeur qui descend une rivière; le bateau a, de son côté, un mouvement plus rapide qu'une voiture traînée par un cheval qui va au pas. Le degré plus ou moins grand de rapidité ou de lenteur d'un mouvement uniforme se mesure par le chemin parcouru pendant l'unité de temps : c'est ce qu'on nomme la *vitesse* de ce mouvement. On dit, par exemple, que le convoi de wagons parcourt 10 mètres par seconde ou 36 kilomètres par heure : chacun des nombres 10 et 36 représente la vitesse du convoi. Une même vitesse peut être représentée par des nombres différents, suivant qu'on adopte telle ou telle unité de temps, telle ou telle

unité de longueur. Aussi, quand on indique le nombre qui représente une vitesse, doit-on toujours faire connaître les unités de temps et de longueur auxquelles il se rapporte. On ne dira pas une vitesse 10, ou une vitesse de 10 mètres; mais on dira une vitesse de 10 mètres par seconde.

§ 12. **Mouvement varié.** — Si les chemins parcourus par le corps, pendant des intervalles de temps successifs égaux entre eux, ne sont pas égaux, le mouvement est dit *varié*. Le mouvement d'un corps qui tombe est un mouvement varié; il en est de même du mouvement d'un convoi de wagons, à l'approche de l'endroit où il doit s'arrêter.

Dans un mouvement varié, la rapidité du mouvement change d'un moment à l'autre. Si l'on conçoit qu'à un instant donné elle s'entretienne sans changer davantage, le mouvement deviendra uniforme; la vitesse de ce mouvement uniforme sera ce qu'on appelle la vitesse du mouvement varié, à l'instant considéré. Lorsqu'on est dans un convoi de wagons qui s'approche du point d'arrivée, on sent très-bien que le mouvement se ralentit progressivement; on dit alors que la vitesse diminue; et si elle était primitivement de 10 mètres par seconde, on conçoit qu'elle deviendra successivement de 9 mètres, de 8 mètres........ de 1 mètre par seconde, pour finir par être tout à fait nulle, lorsque le convoi sera complétement arrêté. Si, à un instant donné, on dit que la vitesse est de 4 mètres par seconde, cela ne voudra pas dire que, pendant une seconde, le convoi parcourt une longueur de 4 mètres; mais cela signifiera que, si la rapidité du mouvement se conservait telle qu'elle est à l'instant considéré, le convoi parcourrait 4 mètres en une seconde.

§ 13. **Mouvement de rotation, vitesse angulaire** — Un grand nombre de pièces qui font partie des machines ne peuvent que tourner autour d'un axe fixe. Telles sont les meules de rémouleur, les roues à chevilles disposées aux orifices des puits de carrières pour en extraire les pierres, les poulies, les roues dentées qui servent à transmettre le mouvement dans un grand nombre de machines, etc. Un pareil mouvement se nomme *mouvement de rotation*. Tous les points du corps qui tourne décrivent des circonférences de cercle situées dans des plans parallèles entre eux, et perpendiculaires à l'axe de rotation; les arcs de cercle décrits dans le même temps par différents points du corps sont d'autant plus grands que ces points sont plus éloignés de l'axe de rotation.

Si l'on imagine une perpendiculaire abaissée d'un point du corps qui tourne sur son axe de rotation, cette perpendiculaire

fera successivement, pendant le mouvement, différents angles avec sa position primitive; ce sont les angles dont le corps a tourné depuis le commencement de son mouvement. Lorsque les angles ainsi décrits par le corps, pendant des intervalles de temps successifs égaux entre eux, sont égaux, quels que soient ces intervalles de temps, on dit que le mouvement de rotation est uniforme. Dans ce cas, les différents points du corps ont des mouvements circulaires et uniformes, et leurs vitèsses sont respectivement proportionnelles à leurs distances à l'axe. On nomme *vitesse angulaire* l'angle dont le corps tourne pendant l'unité de temps. Ainsi on dit que la terre, dans son mouvement de rotation autour de la ligne des pôles, a une vitesse de 15 degrés par heure: cela signifie qu'une ligne qu'on imagine menée à l'intérieur de la terre, perpendiculairement à son axe, décrit un angle de 15 degrés en une heure.

Les mouvements de rotation qu'on peut observer dans les machines étant ordinairement très-rapides, on exprime la vitesse angulaire par le nombre de tours effectués dans l'unité de temps: on dira, par exemple, une vitesse de 300 tours par minute, ou de 5 tours par seconde.

Lorsqu'un corps, en tournant autour d'un axe, ne décrit pas des angles égaux dans des intervalles de temps successifs égaux entre eux, le mouvement de rotation est varié. On appelle vitesse angulaire de ce mouvement varié, à un instant quelconque, la vitesse angulaire du mouvement de rotation uniforme que prendrait le corps, si, à partir de cet instant, son mouvement cessait de s'accélérer ou de se ralentir.

PREMIÈRES NOTIONS SUR LES FORCES.

§ 14. **Inertie de la matière.** — *Un corps qui est en repos ne peut pas se mettre de lui-même en mouvement.*

Un corps qui est en mouvement ne peut pas modifier de lui-même son état de mouvement.

Le premier de ces deux principes est très-clair, et sera admis sans difficulté par tout le monde. On voit bien, il est vrai, les animaux et l'homme passer d'eux-mêmes de l'état de repos à l'état de mouvement : mais cette propriété qu'ils possèdent n'appartient pas à la matière dont ils sont formés; elle dépend de cette partie immatérielle de leur être qui leur donne la vie. Dès que la vie cesse, le corps se retrouve dans les mêmes conditions que les pierres, l'eau, etc.; il n'est plus capable de passer de lui-même de l'état de repos à l'état de mouvement.

Le second principe a besoin d'être expliqué pour être convenablement compris, et aussi pour être complétement admis. Lorsqu'un corps, réduit par la pensée à un point, se trouve animé d'un certain mouvement, et qu'aucune cause extérieure ou intérieure ne tend à modifier son mouvement, il résulte de notre principe que ce corps décrit nécessairement une ligne droite, et que les portions de cette ligne qu'il parcourt dans des temps égaux sont égales, c'est-à-dire que son mouvement est uniforme. En effet, lorsque le corps s'est déplacé, pendant un temps très-court, suivant une petite ligne, qu'on peut toujours regarder comme droite, il n'y a pas de raison pour que, en continuant à se mouvoir, il dévie de la direction de cette ligne, dans un sens plutôt que dans un autre. Lorsqu'on lance une bille sur un sol bien uni, elle se meut en ligne droite; pour qu'elle dévie de cette ligne, il faut qu'elle rencontre un obstacle qui s'oppose à ce qu'elle continue à se mouvoir comme précédemment. On admettra peut-être plus difficilement que la vitesse du corps ne change pas, car, dans l'exemple qui vient d'être cité, d'une bille roulant sur le sol, on voit toujours le mouvement se ralentir peu à peu, et cesser complétement au bout de quelque temps. Mais on doit observer, que plus le sol est uni, plus la bille va loin, quoiqu'on la lance toujours de la même manière. Ce n'est pas la bille qui diminue d'elle-même sa vitesse; mais ce sont les aspérités du sol, jointes à la résistance que la bille éprouve de la part de l'air, qui, en s'opposant au mouvement, le détruisent peu à peu et finissent par le faire disparaître tout à fait.

Il résulte encore du principe dont nous nous occupons que si un corps tourne autour d'un axe fixe, sans qu'aucune cause vienne agir sur lui pour altérer son mouvement, il devra continuer à tourner indéfiniment avec la même vitesse angulaire. C'est ainsi qu'une meule de rémouleur, une fois mise en mouvement, et supposée soustraite à toute action extérieure, telle que le frottement de son axe sur son support, la résistance de l'air, la résistance produite par le corps qu'on aiguise sur sa surface, devra conserver indéfiniment un mouvement uniforme de rotation.

Ces deux principes, en vertu desquels un corps ne peut pas, de lui-même, passer de l'état de repos à l'état de mouvement, ni passer d'un état de mouvement à un autre, constituent ce qu'on appelle l'*inertie* de la matière.

§ 15. **Forces.** — Pour qu'un corps se mette en mouvement, ou bien pour qu'il prenne un mouvement différent de celui qu'il avait, il faut une cause : cette cause, quelle qu'elle soit, on la

nomme *force*. *Une force est donc une cause quelconque de mouvement ou de modification du mouvement.*

Les forces dont nous aurons à nous occuper sont de diverses espèces :

1° Lorsqu'on abandonne un corps qu'on tenait dans la main, il tombe sur la terre. La force qui produit ce mouvement est la *pesanteur*. Tous les corps que nous voyons autour de nous sont soumis à son action. C'est elle qui détermine le mouvement de l'eau dans les fleuves et les rivières.

2° Lorsqu'on déforme un corps solide, une lame d'acier par exemple, sans dépasser la limite de l'élasticité, le corps abandonné à lui-même revient à sa forme primitive; les molécules du corps se meuvent, dans ce cas, en vertu de certaines forces intérieures qui tendent à les rétablir dans les positions respectives qu'elles avaient précédemment, soit en les rapprochant, soit en les éloignant. Lorsqu'on comprime un gaz, et qu'on lui donne ensuite la liberté de se dilater, il se dilate en effet; ses molécules s'éloignent les unes des autres en vertu des forces intérieures. Ces forces intérieures sont ce que l'on nomme les *forces moléculaires*, dont les unes sont attractives, les autres répulsives. Ce sont les forces moléculaires qui forment le principe de la puissance des machines à vapeur.

3° Dans les phénomènes électriques et magnétiques, on observe des attractions et des répulsions. Un bâton de cire à cacheter, frotté avec du drap, attire des barbes de plume ; un aimant attire un morceau de fer. Les forces qui produisent ces mouvements sont des *forces électriques* et *magnétiques*. Nous aurons à nous en occuper lorsque nous parlerons des machines électro-motrices.

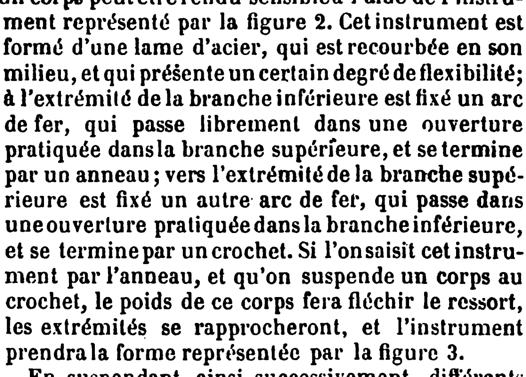
4° Enfin, une quatrième espèce de forces consiste dans celles qui sont développées par l'homme et les animaux, que l'on confond sous le nom de *moteurs animés*.

§ 16. **Pressions, tensions.** — Une force qui est appliquée à un corps ne détermine pas toujours le mouvement de ce corps. Une pierre posée sur une table y reste immobile; et cependant cette pierre est soumise à l'action de la pesanteur : car si l'on imaginait que la table disparût instantanément, elle tomberait aussitôt. Une pierre, suspendue à l'extrémité inférieure d'une corde dont l'extrémité supérieure est attachée à un point fixe, reste également immobile; elle tomberait immédiatement si l'on venait à couper la corde. Toutes les fois qu'une force ne produit pas le mouvement du corps auquel elle est appliquée, elle donne lieu à une *pression* ou à une *tension*. La pierre posée sur une table exerce une pression sur cette table ; la pierre suspendue

à une corde détermine une tension de la corde. Un homme qui cherche à soulever un fardeau trop lourd pour lui, exerce une pression sur ce fardeau dans les points où il le touche de ses mains.

§ 17. **Poids.** — Lorsqu'un corps, soumis à la seule action de la pesanteur, est maintenu dans l'immobilité par un obstacle, la pression ou la tension qui en résulte est ce qu'on appelle le *poids* du corps. On doit bien se garder de confondre les mots *pesanteur* et *poids :* le mot *pesanteur* désigne la cause générale qui fait tomber les corps à la surface de la terre ; le mot *poids* indique un effet résultant de l'action de cette cause générale sur un corps en particulier.


Fig. 2.
Fig. 3.


Le poids d'un corps peut être rendu sensible à l'aide de l'instrument représenté par la figure 2. Cet instrument est formé d'une lame d'acier, qui est recourbée en son milieu, et qui présente un certain degré de flexibilité; à l'extrémité de la branche inférieure est fixé un arc de fer, qui passe librement dans une ouverture pratiquée dans la branche supérieure, et se termine par un anneau ; vers l'extrémité de la branche supérieure est fixé un autre arc de fer, qui passe dans une ouverture pratiquée dans la branche inférieure, et se termine par un crochet. Si l'on saisit cet instrument par l'anneau, et qu'on suspende un corps au crochet, le poids de ce corps fera fléchir le ressort, les extrémités se rapprocheront, et l'instrument prendra la forme représentée par la figure 3.

En suspendant ainsi successivement différents corps au crochet, on verra que les extrémités du ressort se rapprocheront plus ou moins. Lorsqu'elles se rapprocheront de la même quantité, sous l'action des poids de différents corps, on dira que les poids de ces corps sont égaux entre eux. Si l'on suspend ensemble au crochet deux de ces corps de même poids, le ressort fléchira plus que lorsqu'on n'en suspendait qu'un seul. Tout corps qui, suspendu au crochet produira la même flexion que ces deux corps réunis, sera dit avoir un poids double du poids de chacun d'eux. On dira de même que le poids d'un corps est triple, quadruple, etc., du poids d'un des premiers corps, lorsqu'il produira sur le ressort la même flexion que trois, quatre, etc., de ces premiers corps réunis ensemble.

Le gramme étant le poids d'un centimètre cube d'eau pure, prise à la température de son maximum de densité, il sera facile, à l'aide de l'instrument représenté par la figure 2, de trouver combien

de grammes pèse un corps. Pour plus de commodité, on marquera sur l'arc extérieur, qui aboutit à l'anneau, les points où devra s'arrêter l'extrémité du ressort, lorsqu'on suspendra au crochet des poids de 1 gramme, 2 grammes, 3 grammes, etc.

Il est bien clair qu'un seul ressort ne pourra pas servir pour peser les corps légers et les corps très-lourds : le poids qu'on suspendra au crochet ne devra jamais être capable de dépasser la limite de l'élasticité du ressort, sans quoi l'instrument se détériorerait. On prendra donc des ressorts très-flexibles pour les corps légers, et des ressorts de moins en moins flexibles, à mesure qu'ils seront destinés à peser des corps plus lourds. Mais le principe de la mesure du poids d'un corps à l'aide de ces différents ressorts restera le même.

Lorsque le poids d'un corps se compose d'un grand nombre de grammes, on l'évalue ordinairement en kilogrammes (le kilogramme vaut 1 000 grammes); c'est le kilogramme que nous prendrons le plus habituellement pour unité de poids. On emploie quelquefois une unité plus grande, la tonne, qui vaut 1 000 kilogrammes.

§ 18. **Mesure des forces, dynamomètres.** — Quelle que soit la force qui détermine une pression ou une tension, cette pression ou cette tension pourra être assimilée au poids d'un corps, et évaluée en kilogrammes. Si un cheval tire une corde attachée à un corps qu'il cherche à mettre en mouvement, on peut concevoir que la corde soit coupée en un point, et que les deux bouts ainsi séparés soient attachés (fig. 4) l'un à l'anneau, l'autre au crochet de l'instrument décrit précédemment; la force de traction sera ainsi exercée par l'intermédiaire de cet instrument, le ressort fléchira, et la tension de la corde sera équivalente au poids du corps qui, étant suspendu au ressort, le fléchirait de la même quantité. Cette tension pourra donc être représentée par un certain nombre de kilogrammes.

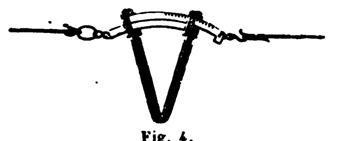


Fig. 4.

On prend pour mesure d'une force, la grandeur de la pression ou de la tension qu'elle produit, lorsqu'elle agit sur un corps qui ne peut se déplacer. Ainsi la force qui fait tomber un corps est mesurée par le poids de ce corps : ainsi, dans l'exemple qu'on vient de prendre, la force développée par le cheval est mesurée par la tension de la corde. Une force quelconque pourra donc toujours être représentée par un certain nombre de kilogrammes.

Pour trouver le nombre de kilogrammes qui représente

une force, il suffira de la faire agir sur un ressort pareil à celui de la figure 2. Mais on pourra aussi employer pour cela des ressorts de formes différentes, tels que ceux qui sont représentés par les figures 5 et 6. Le premier (fig. 5) est un ressort contourné en hélice, ou ce que l'on nomme un ressort à boudin, qui est enfermé dans un cylindre. Une tige, qui le traverse dans toute sa longueur, suivant l'axe du cylindre, se termine inférieurement par une tête sur laquelle s'appuie l'une des extrémités du ressort; l'autre bout de cette tige est muni d'un anneau qui sert à suspendre l'instrument. Le cylindre, qui appuie sur l'extrémité supérieure du ressort, porte un crochet auquel on applique la force qu'il s'agit de mesurer. La tige sort plus ou moins du cylindre, suivant qu'il est soumis à une force de traction plus ou moins grande : on la gradue d'avance, en suspendant à son crochet des corps dont les poids sont connus.

Fig. 5.

La figure 6 représente deux lames de ressort, dont les extrémités sont réunies dans deux espèces de chapes à l'aide de boulons; un anneau est attaché à l'une des lames, et un crochet à l'autre lame. Les milieux de ces deux lames s'écartent plus ou moins l'un de l'autre, suivant que la force de traction exercée sur le crochet est plus ou moins grande.

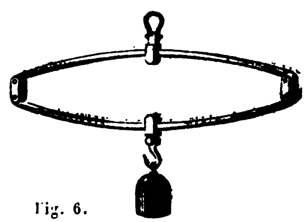


Fig. 6.

Tous ces instruments (fig. 2, 5 et 6) portent le nom de *dynamomètres* (de δυναμις, force, et μέτρον, mesure). Le dernier (fig. 6), imaginé par M. Poncelet, jouit d'une propriété précieuse pour les recherches expérimentales sur la grandeur des forces développées dans diverses circonstances : c'est que l'augmentation de la distance des points milieux des lames est proportionnelle à la grandeur de la force appliquée au dynamomètre. Si une force de 1 kilogramme a augmenté la distance de ces points d'un millimètre, une force de 2 kilogrammes l'augmentera de 2 millimètres, une force de 3 kilogrammes l'augmentera de 3 millimètres, et ainsi de suite, mais seulement jusqu'à une certaine limite que la grandeur de la force ne devra pas dépasser.

§ 19. **Direction d'une force.** — On appelle *direction d'une force*, la direction du mouvement que cette force communiquerait à un corps, dans le cas où ce corps, primitivement en repos, pourrait céder librement à l'action de la force, sans qu'aucun

obstacle le gênât dans son mouvement. Un corps qu'on tient dans la main, et qu'on abandonne ensuite à lui-même, tombe en parcourant une ligne droite verticale; cette verticale est la direction de la force qui le fait tomber.

Pour représenter d'une manière sensible les diverses forces qui agissent sur un corps, ou sur un ensemble de corps, on trace par le point d'application de chacune d'elles une ligne droite qui indique sa direction, et l'on porte sur ces diverses lignes droites, à partir des points d'application des forces, et dans le sens de leur action, des longueurs proportionnelles à ces forces. Si l'on convient, par exemple, de représenter une force de 1 kilogramme par une longueur de 1 centimètre, la figure 7 indique que le corps M est soumis à des forces P, Q, R, égales respectivement à 2^k, 3^k, 1^k, appliquées aux points A, B, C, et dirigées suivant les lignes droites qui partent de ces trois points. Souvent, pour fixer plus clairement le sens dans lequel agit une force, on termine par une flèche la ligne qui la représente, ainsi que le montre la figure 7.



Fig. 7.

COMPOSITION DES FORCES.

§ 20. **Résultante, composantes.** — Lorsque plusieurs forces agissent sur un même corps solide, il arrive souvent qu'on peut trouver une autre force qui, agissant seule sur le corps, soit capable de produire exactement le même effet.

Plusieurs chevaux étant attelés à une voiture, on conçoit qu'on puisse les remplacer par un moteur unique, une locomotive, par exemple, qui tire la voiture et donne lieu au même mouvement; la force de traction de la locomotive produira le même effet que les forces développées simultanément par les chevaux.

La force unique, dont l'action peut ainsi être substituée à l'action simultanée de plusieurs autres forces, sans que l'effet soit changé, se nomme la *résultante* de ces forces; celles-ci à leur tour, par opposition, prennent le nom de *composantes*. La composition des forces a pour objet de déterminer la résultante, lorsque l'on connaît les composantes.

§ 21. **Équilibre.** — Avant d'exposer les règles de la composition des forces, il est nécessaire de définir le mot *équilibre*, dont nous aurons souvent à nous servir. Il peut arriver que plusieurs forces, agissant sur un corps, ou sur un ensemble de corps, se neutralisent mutuellement, en sorte que les choses se passent



de la même manière que si les forces n'agissaient pas : on dit alors que ces forces *se font équilibre*, ou bien que le corps ou l'ensemble de corps auquel ces forces sont appliquées *est en équilibre*.

On doit bien distinguer le mot *repos* du mot *équilibre*. Le premier indique l'état d'un corps qui ne se déplace pas; il n'y entre aucune idée de forces. Le second désigne l'état d'un corps qui, étant soumis à l'action de plusieurs forces, se trouve dans les mêmes conditions que si ces forces n'agissaient pas. Un corps peut être animé d'un mouvement, sans être soumis à l'action d'aucune force (§ 14); si l'on vient à lui appliquer des forces qui se font équilibre, son mouvement n'en sera nullement troublé, puisque ces forces se détruisent mutuellement : l'équilibre des forces appliquées à un corps n'entraîne donc pas l'idée de l'immobilité du corps. Ainsi les mots *repos* et *équilibre* ont des significations essentiellement différentes.

§ 22. **Équilibre stable, équilibre instable.** — L'acception qu'on donne vulgairement au mot *équilibre* n'est pas la même que celle que nous lui attribuons ici. On dit qu'on a mis un corps en équilibre, lorsqu'on est parvenu à lui donner une position dans laquelle il reste immobile, mais dont il s'éloigne immédiatement sous l'action de la plus petite cause extérieure. Si l'on a pu, par exemple, placer un cône sur une table, en l'appuyant seulement par son sommet (fig. 8), sans qu'il tombe d'un côté ni d'un autre, on dit qu'on a mis ce cône en équilibre. Pour nous, le cône est aussi bien en équilibre lorsqu'il repose sur la table par sa base (fig. 9) que par son sommet. Dans l'un et l'autre cas, la force qui tend à faire tomber le cône, qui le ferait tomber si la table ne le soutenait pas, est mise en équilibre par la pression que la table exerce de bas en haut sur la partie inférieure du cône. Ce qui distingue ces deux cas, c'est que, dans l'un (fig. 8), pour peu qu'on dérange le cône, il ne reprendra pas la position qu'il avait : l'équilibre est *instable*. Tandis que dans l'autre (fig. 9), si l'on dérange un peu le cône, en tirant son sommet d'un côté quelconque, il reprendra immédiatement sa position primitive : l'équilibre est *stable*. Ainsi ce qu'on appelle vulgairement équilibre, pour nous c'est l'équilibre instable.

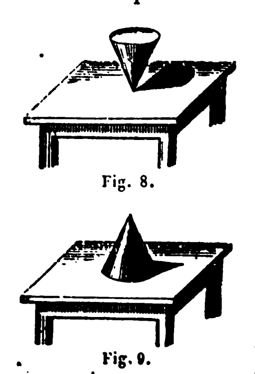

Fig. 8.

Fig. 9.

§ 23. **Forces agissant suivant une même direction.** — Si un corps est soumis à l'action de trois forces, une de 3^k, une de 5^k, et une de 6^k, appliquées au point A (fig. 10), suivant une même direction AB, et dans le même sens, ce corps est dans les mêmes conditions que si, la ligne AB étant verticale, trois poids de 3^k, de 5^k et de 6^k, étaient suspendus au point A. Or il résulte de ce qui a été dit précédemment (§ 17), qu'un poids unique de 14^k (14 est la somme des nombre 3, 5 et 6) produira le même effet sur le point A : on peut donc dire que des forces, en nombre quelconque, appliquées à un même point, dans une même direction et dans un même sens, ont une résultante égale à leur somme, et agissant dans la direction et dans le sens des composantes.



Fig. 10.

Si un corps est soumis à l'action de deux forces égales appliquées à un même point, suivant la même direction, mais en sens contraires, il est clair que ces deux forces se font équilibre.

Considérons un corps soumis à l'action de trois forces, une de 3^k, une autre de 5^k, et une troisième de 6^k, agissant sur le point A (fig. 11), dans le sens AB, et à deux forces, de 4^k et de 7^k, dans le sens contraire AC. On pourra remplacer les trois premières forces par une force de 14^k agissant dans le sens AB, et les deux dernières par une force de 11^k agissant dans le sens AC. Mais la force de 14^k peut être regardée comme provenant de la composition d'une force de 11^k, et d'une autre de 3^k, agissant toutes deux suivant AB : la première de ces deux composantes est détruite par la force égale, qui agit en sens contraire, et il ne reste plus que la force de 3^k, agissant dans le sens AB, qui tient complétement lieu des cinq forces données. Il résulte de là que, pour composer plusieurs forces agissant sur un point, suivant une même direction, mais dans des sens différents, il faut faire la somme des forces qui tirent dans un sens, et la somme des forces qui tirent en sens contraire ; puis retrancher la plus petite de ces deux sommes de la plus grande : la différence représentera la résultante de toutes les forces données, résultante qui agira dans le sens de la plus grande des deux sommes qu'on aura obtenues.



Fig. 11.

Si plusieurs forces, agissant sur un corps suivant une même ligne droite, étaient appliquées en différents points de cette ligne droite, on devrait les traiter comme si elles étaient toutes appli-

quées à un même point : car il est clair que l'action d'une force reste la même, lorsqu'on l'applique successivement en différents points de sa direction.

§ 14. Forces parallèles. — Pour démontrer la composition des forces agissant suivant des directions parallèles, nous nous servirons de l'appareil suivant. Une barre prismatique de bois AB (fig. 12) est suspendue en son milieu, à l'aide d'un couteau d'acier qui la traverse et fait saillie des deux côtés. L'arête de ce couteau, tournée vers le bas, s'appuie sur deux plans d'acier fixés dans une chape qui est adaptée au support CD : en sorte que la barre peut tourner librement autour de cette arête. La face antérieure de cette barre porte 10 divisions d'égale longueur, de chaque côté du point de suspension ; et, au-dessous des points de division, sont disposés de petits anneaux, auxquels on peut accrocher des poids tellement construits qu'on puisse d'ailleurs les suspendre les uns au-dessous des autres.

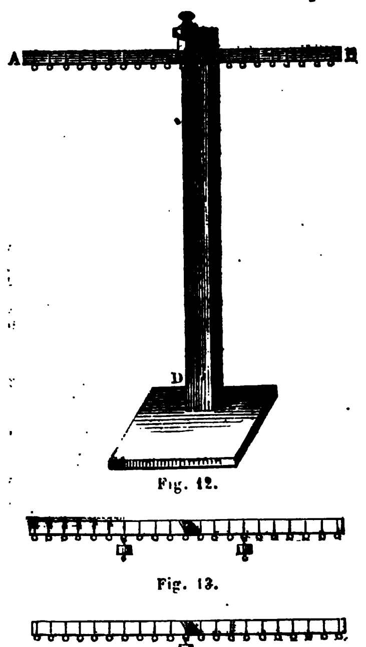


Fig. 12.

Fig. 13.

Fig. 14.

Si l'on accroche d'abord deux poids égaux, de chacun 100 grammes par exemple, en deux points également éloignés du milieu de la barre (fig. 13), on voit qu'elle demeure horizontale. Si l'on enlève ces deux poids, et qu'on les accroche l'un au-dessous de l'autre, au milieu même de la barre (fig. 14), elle demeure encore horizontale ; et l'on admettra aisément que, dans l'un et l'autre cas, le couteau presse de la même manière les petits plans d'acier qui le supportent. Si l'on conservait quelque doute sur ce dernier fait, il suffirait de suspendre la chape qui porte les plans d'acier à un ressort dynamométrique, et l'on verrait ce ressort fléchir de la même quantité dans les deux cas. La figure 13 représente la barre sou-

mise à l'action de deux forces égales et parallèles : on conclut de ce qui précède, que ces deux forces peuvent être remplacées par une force unique, double de chacune d'elles, et appliquée au milieu de la ligne droite qui joint leurs points d'application.

Imaginons maintenant qu'on suspende à la barre AB (fig. 12) 11 poids de chacun de 1 hectogramme, également espacés le long de cette barre, et que celui du milieu corresponde au point de suspension de la barre, ainsi que le montre la figure 15. La barre, ainsi régulièrement chargée, se maintiendra dans une position horizontale. Mais, d'après ce qu'on vient de voir, on peut prendre deux de ces poids, placés à égale distance du milieu, et les suspendre au milieu, sans que l'effet produit sur la barre cesse d'être le même : elle restera toujours horizontale, et pressera toujours également la chape qui la supporte. En transportant ainsi successivement deux à deux, au milieu de la barre, les poids qui étaient répartis uniformément dans sa longueur, on finira par obtenir la disposition que représente la figure 16 ; et l'on en conclura que la barre AB, chargée de 11 poids égaux, de chacun 1 hectogramme, régulièrement répartis sur toute sa longueur, se trouve dans les mêmes conditions que lorsqu'elle est chargée d'un poids unique de 11 hectogrammes suspendu à son milieu.

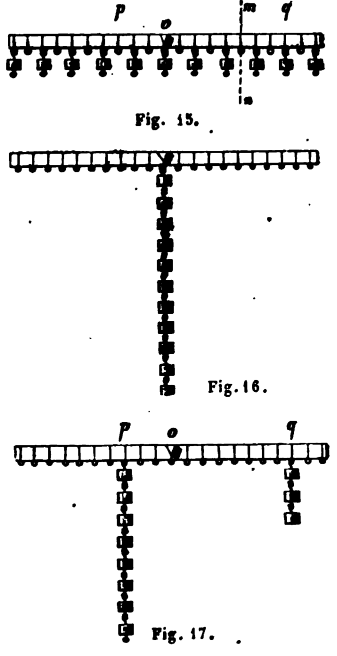


Fig. 15.
Fig. 16.
Fig. 17.

Reprenons la barre régulièrement chargée de la figure 15, et divisons les 11 poids qu'elle porte en deux groupes, par la ligne mn, qui en laisse 8 à gauche et 3 à droite. Les 8 poids de gauche peuvent être réunis, d'après ce qu'on vient de voir, au point p, milieu de la longueur sur laquelle ils sont régulièrement répartis; les 3 poids de droite pourront également être réunis au point q,

par la même raison : et la barre présentera la disposition de la figure 17, sans cesser d'être dans les mêmes conditions. Donc deux poids, l'un de 8 hectogrammes, et l'autre de 3 hectogrammes, accrochés, le premier en p, le second en q, produisent le même effet qu'un poids unique de 11 hectogrammes accroché en o. Si l'on observe de plus que op contient 3 divisions de la barre, et que oq en contient 8, on pourra en conclure la proposition suivante : *Deux forces parallèles, appliquées à un corps solide, ont une résultante égale à leur somme, parallèle à chacune d'elles, et dont le point d'application divise la distance des points d'application des composantes en deux parties qui sont inversement proportionnelles aux grandeurs de ces composantes.*

§ 25. Soit un corps M (fig. 18) soumis à l'action de quatre forces parallèles, dont l'une de 3^k est appliquée au point A; une autre de 5^k est appliquée au point B; une troisième de 4^k est appliquée au point C, et enfin une quatrième de 1^k est appliquée au point D. Les deux forces appliquées aux points A et B peuvent être remplacées par une force de 8^k, appliquée au point O, qui est tel qu'on a

$$\frac{OA}{OB} = \frac{5}{3}.$$

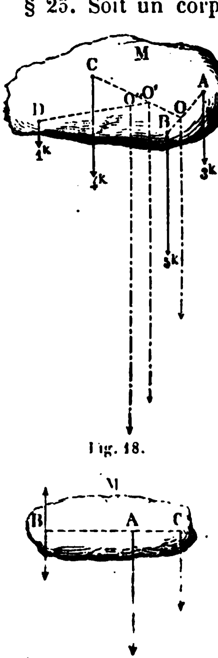


Fig. 18.

Fig. 19.

Cette force de 8^k peut être composée avec la force appliquée au point C, et il en résultera une force de 12^k, appliquée au point O'. Enfin cette nouvelle résultante partielle se composera avec la force appliquée au point D, et l'on obtiendra définitivement une force de 13^k, appliquée au point O'', et qui sera la résultante de toutes les forces données. On voit par là comment on pourra toujours composer en une seule, des forces parallèles et de même sens, quel que soit leur nombre; la résultante qu'on obtiendra sera toujours égale à la somme des composantes.

§ 26. Si un corps M (fig. 19) est soumis à l'action de deux forces parallèles et de sens contraires, l'une de 11^k appliquée en A, et l'autre de 4^k appliquée en B, on trouvera leur résultante de la manière suivante. On regardera la plus

grande des deux forces, celle de 11^k, comme provenant de la composition d'une force de 4^k appliquée en B, et d'une force de 7^k appliquée en un point C qu'on déterminera aisément : pour cela on prolongera BA, et l'on prendra la distance AC telle qu'on ait

$$\frac{AC}{AB} = \frac{4}{7}.$$

La force de 11^k étant remplacée par ses deux composantes, on aura au point B deux forces de 4^k chacune, et de sens contraires, qui se détruiront; et il ne restera plus qu'une force de 7^k, appliquée au point C, qui sera la résultante des deux forces données.

Si les deux forces parallèles et de sens contraires étaient égales, on ne pourrait pas trouver une force unique qui pût complétement les remplacer; ces deux forces n'auraient pas de résultante.

§ 27. Lorsqu'un corps sera soumis à l'action d'autant de forces parallèles qu'on voudra, agissant les unes dans un sens, les autres en sens contraire, on cherchera la résultante des premières, puis celle des dernières, et l'on obtiendra ainsi deux résultantes partielles, agissant en sens contraires et dans des directions parallèles. Il n'y aura plus ensuite qu'à composer entre elles ces deux résultantes partielles, conformément à ce qui a été dit dans le § 26. Cette dernière composition pourra toujours s'effectuer, à moins que les deux résultantes partielles ne soient égales, et n'agissent pas suivant la même ligne droite : dans ce cas exceptionnel, les forces données n'auront point de résultante.

§ 28. **Du levier.** — Avant d'aller plus loin, nous appliquerons ce qui précède à la recherche du principe du *levier*, principe qui nous servira ensuite pour trouver la résultante de deux forces appliquées à un même point, suivant des directions différentes.

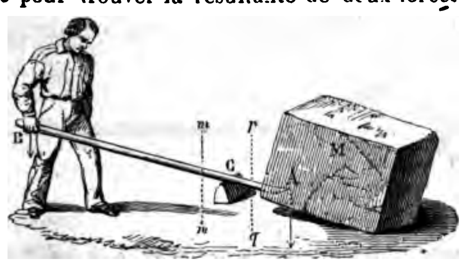


Fig. 20.

Le levier est une barre AB (fig. 20) à l'aide de laquelle on soulève un corps pesant M, qui porte sur l'extrémité A, en exerçant un effort à l'autre extrémité B. Cette barre est appuyée en C, sur l'arête d'un support, autour de laquelle elle peut tourner, lorsque l'effort appliqué en B est suffisamment grand. Supposons que le corps M, déjà soulevé d'une petite quantité, soit

maintenu immobile, à l'aide du levier, dans la position qui lui a été donnée : le levier se trouvera soumis à l'action de deux forces, dont l'une est la pression que le corps M exerce en A, et l'autre est l'effort appliqué en B pour empêcher le corps M de retomber. Ces deux forces, que nous regarderons comme parallèles, peuvent, d'après ce qui précède, être remplacées par une force unique, produisant le même effet sur le levier. Cette force unique doit passer par le point C : car s'il en était autrement, si elle était dirigée à gauche ou à droite de ce point, suivant *mn*, ou suivant *pq*, le levier tournerait nécessairement autour du point C, à gauche ou à droite, sous l'action de cette force qui lui serait seule appliquée. L'immobilité du levier, sous l'action simultanée des deux forces qui lui sont appliquées en A et en B, exige donc que la résultante de ces deux forces passe par le point C. Mais on sait que, pour cela, il faut que les forces soient inversement proportionnelles aux distances AC et BC, qu'on nomme les *bras du levier*. Si CB est 10 fois, 100 fois, 1 000 fois plus grand que AC, l'effort qu'on devra exercer en B sera 10 fois, 100 fois, 1 000 fois plus petit que la pression supportée en A par le levier, et à laquelle il s'agira de faire équilibre. De là le principe suivant : *Deux forces, agissant sur un levier, se font équilibre, lorsqu'elles sont entre elles dans le rapport inverse des bras de levier aux extrémités desquels elles sont appliquées.*

Ce principe a été découvert par Archimède, qui en a exprimé toute l'importance par ce mot bien connu : « Qu'on me donne un levier et un point d'appui, et je soulèverai le monde. »

§ 29. Le levier, sur lequel a été fait le raisonnement précédent, était supposé droit, et soumis à l'action de deux forces parallèles l'une à l'autre. Examinons maintenant un levier coudé ACB (fig. 21) aux extrémités duquel sont appliquées deux forces, respectivement perpendiculaires aux bras de levier AC et BC. Imaginons que le bras de levier BC soit supprimé, et qu'on le remplace par un bras de levier B'C, de même longueur, mais dirigé suivant le prolongement du bras de levier AC : le levier coudé ACB se trouvera remplacé par un levier droit ACB'. On admettra sans peine que, si l'on applique en B', perpendiculairement à B'C, la force qui était appliquée en B, elle agira de la même

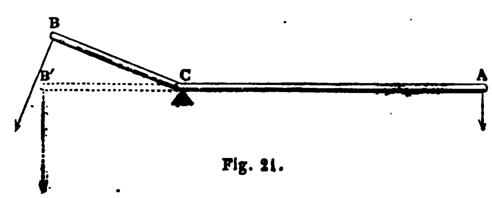


Fig. 21.

manière, pour faire tourner le levier autour du point d'appui C; et que, dans l'un et l'autre cas, elle devra avoir la même grandeur, pour faire équilibre à la force qui est appliquée au point A. Mais nous avons trouvé que, pour l'équilibre du levier droit soumis à l'action de deux forces parallèles, il fallait que les forces fussent inversement proportionnelles aux bras de levier aux extrémités desquels elles agissent : il en sera donc de même du levier coudé, soumis à l'action de forces dirigées perpendiculairement aux bras de ce levier.

Il arrivera souvent que les forces appliquées à un levier droit ou coudé ne seront pas dirigées perpendiculairement à leurs bras de levier.

Dans ce cas, si l'on imagine (fig. 22) des perpendiculaires CA', CB', abaissées du point d'appui C sur les directions des deux forces, on pourra regarder les forces comme étant dans les mêmes conditions que si elles étaient appliquées aux extrémités du levier coudé A'CB'; et l'on en conclura que, pour qu'il y ait équilibre, il faut que les forces soient inversement proportionnelles aux longueurs des perpendiculaires CA' et CB'. On voit donc que, pour que le principe du levier, énoncé précédemment, convienne à tous les cas, il faut qu'on entende par bras de levier, aux extrémités desquels les forces sont appliquées, les perpendiculaires abaissées du point d'appui sur les directions des forces.

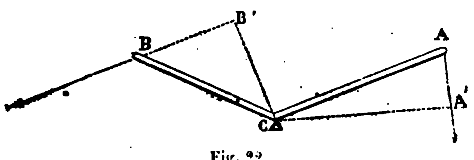


Fig. 22.

§ 30. Lorsqu'un levier ABC (fig. 23) aura son point d'appui à l'une de ses extrémités C, et sera soumis à deux forces appliquées en A et B, dans des directions parallèles, mais en sens contraires, on pourra considérer CA et CB comme deux bras de levier, aux extrémités desquels ces forces agissent, et l'équilibre aura lieu lorsque les forces seront inversement proportionnelles à ces bras de levier. On peut donner la brouette (fig. 24) comme exemple de ce genre de levier. Le point d'appui est l'axe de la roue; l'une des forces appliquées est le poids du corps placé dans

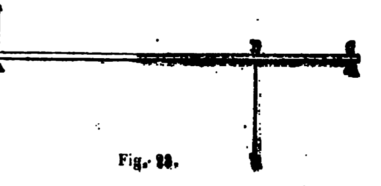


Fig. 23.

la brouette ; et l'autre force est la résultante des deux pressions exercées de bas en haut par les mains de l'homme qui tient les manches de cette brouette.



Fig. 24.

§ 31. Dans tout ce que nous venons de dire relativement au levier, nous l'avons toujours regardé comme étant un corps solide de forme invariable. Il n'en est pas réellement ainsi : un effort, quelque petit qu'il soit, déforme toujours un peu le corps auquel il est appliqué. Lorsqu'un levier est soumis à l'action de certaines forces, il commence par fléchir, puis il conserve la nouvelle forme qu'il a prise, tant que les forces agissent sur lui; il se trouve alors dans les mêmes conditions que s'il n'avait jamais eu d'autre forme que celle que les forces lui ont donnée, et l'on peut lui appliquer, en toute rigueur, ce qui a été dit précédemment pour un levier de forme invariable. Il est clair que, quand on voudra se servir d'un levier, on devra toujours le prendre assez solide pour que la déformation qu'il éprouvera, sous l'action des forces, ne dépasse pas la limite de son élasticité.

§ 32. **Forces appliquées à un point dans diverses directions.** — Il est aisé de reconnaître que deux forces, appliquées à un même point, dans deux directions différentes, ont une résultante. Imaginons pour cela qu'une corde ACB (fig. 25) ait été attachée, par ses deux extrémités, en deux points fixes A et B ; et qu'au point C on ait suspendu un poids de 10^k, à l'aide d'une autre corde CD. Le poids se placera de manière que la corde CD soit verticale ; les deux portions AC et CB de la première corde seront tendues, et leurs tensions seront des forces appliquées au point C, suivant CA et CB, qui maintiendront en équilibre le poids de 10^k. Mais ce poids serait également tenu en équilibre par une force unique de 10^k, agissant sur le point C, verticalement et de bas en haut, suivant CD′ : cette dernière force produirait donc, à elle seule, le même effet que



Fig. 25.

les forces dirigées suivent CA et CB, agissant ensemble, et par suite elle est leur résultante.

§ 33. Soit M (fig. 26) un corps soumis à l'action de deux forces, l'une de 3^k, l'autre de 5^k, représentées en grandeur et en direction par les lignes droites AB, AC. *Pour trouver la résultante de ces deux forces, on construira le parallélogramme* ABCD ; *la diagonale* AD *représentera cette résultante, en grandeur et en direction*. Nous diviserons en deux parties la démonstration de cette proposition, et nous commencerons par prouver que la résultante des deux forces données est dirigée suivant la diagonale AD.

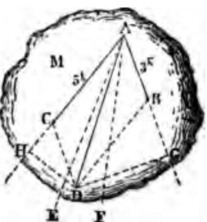


Fig. 26.

Nous avons un moyen bien simple de reconnaître si la résultante des forces AB et AC est dirigée suivant AD : c'est de supposer que le point D du corps soit fixe, et que le corps ne puisse que tourner autour de ce point. Si la résultante passe, en effet, par le point D, la fixité de ce point détruira complétement son action, et le corps restera en équilibre; il sera donc aussi en équilibre, lorsqu'au lieu de la résultante, ce seront les composantes AB et AC qui agiront sur lui. Si, au contraire, la résultante des forces données passait à gauche ou à droite du point D, si elle était dirigée suivant AE ou AF, on ne mettrait pas le corps en équilibre, en fixant le point D, puisque cette résultante tendrait à le faire tourner à gauche ou à droite, et que rien ne s'opposerait à ce qu'il tournât réellement : le corps ne serait donc pas en équilibre sous l'action des forces AB et AC, qui doivent produire le même effet que leur résultante. Or, si nous abaissons du point D, qui est supposé fixe, des perpendiculaires DG, DH sur les directions des deux forces, nous pourrons regarder ces forces comme étant dans les mêmes conditions que si elles agissaient sur un levier coudé, dont les bras seraient DG et DH. D'ailleurs les deux triangles DBG, DCH sont semblables, puisqu'ils sont rectangles, et que les angles en B et en C sont égaux ; ils fourniront donc la proportion

$$\frac{CD}{BD} = \frac{DH}{DG},$$

ou bien, en observant que CD est égal à AB, et que BD est égal à AC, comme côtés opposés d'un parallélogramme,

$$\frac{AB}{AC} = \frac{DH}{DG}.$$

Donc les forces AB et AC sont inversement proportionnelles à

leurs bras de levier DG et DH, et par suite ces deux forces se font équilibre. On doit en conclure, d'après ce qu'on vient de dire, que la résultante de ces deux forces passe par le point D, c'est-à-dire qu'elle est dirigée suivant la diagonale AD.

Pour la démonstration précédente, la figure 26 a été faite de manière que le point D fasse partie du corps M, auquel les forces AB et AC sont appliquées : mais il est clair que la direction de la résultante de ces forces ne dépend en aucune manière de la forme ni des dimensions du corps sur lequel elles agissent, et que, dans tous les cas, cette direction sera celle de la diagonale du parallélogramme formé sur les deux lignes droites qui représentent les composantes en grandeur et en direction.

§ 34. Passons à la seconde partie de la proposition énoncée au commencement du § 33, qui consiste en ce que la résultante des deux forces AB et AC est représentée en grandeur par la diagonale AD. Nous observerons d'abord que, quand on connaît les directions de deux forces appliquées à un point, la direction de leur résultante, et la grandeur de l'une des composantes, on peut, par ce qui précède, trouver la grandeur de l'autre composante. Soit ACB (fig. 27) une corde dont une extrémité est fixée au point A, et dont on tire l'autre extrémité B; au point C de cette corde est suspendu un poids, et la force de traction exercée au point B, pour maintenir ce poids en équilibre, est mesurée par un dynamomètre. On sait que les tensions des cordons CA et CB ont une résultante dirigée suivant la verticale CE, et l'on

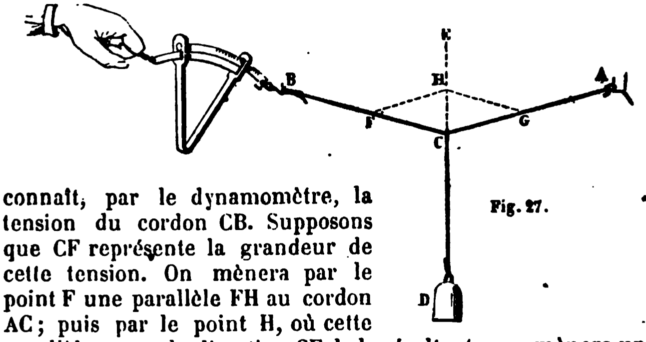


Fig. 27.

connaît, par le dynamomètre, la tension du cordon CB. Supposons que CF représente la grandeur de cette tension. On mènera par le point F une parallèle FH au cordon AC; puis par le point H, où cette parallèle coupe la direction CE de la résultante, on mènera une parallèle HG au cordon CB : la longueur CG représentera la grandeur de la tension du cordon AC. On voit, en effet, que si

cette tension était représentée par une longueur plus grande ou plus petite que CG, la résultante ne serait pas dirigée suivant la diagonale du parallélogramme construit sur les lignes qui représentent les composantes.

Lorsqu'un corps M (fig. 28) est soumis à l'action de deux forces AB, AC, ces deux forces ont une résultante, qui est dirigée suivant la diagonale AD du parallélogramme ABDC, ainsi que nous l'avons démontré. Si nous appliquons au corps, suivant AF, une force égale et directement opposée à la résultante, elle fera équilibre à cette résultante, et sera par conséquent capable de faire aussi équilibre à ses composantes : ainsi le corps M, soumis à l'action des forces AB, AC, et d'une force agissant suivant AF, et égale à la résultante que nous cherchons, se trouvera en équilibre. La force AC, faisant équilibre aux deux autres, mettrait également en équilibre leur résultante : donc la résultante de la force AB, et de la force appliquée suivant AF, est dirigée suivant la ligne AE, prolongement de AC. Ainsi nous connaissons les directions AB, AF de deux forces, la direction AE de leur résultante, et la grandeur AB de l'une d'elles ; nous pouvons, comme nous l'avons fait voir il n'y a qu'un instant, déterminer la grandeur de la composante dirigée suivant AF. Pour cela, par le point B, nous mènerons BE parallèle à AF, puis, par le point E, nous mènerons EF parallèle à AB. La longueur AF, ainsi obtenue, représentera la grandeur de la force dirigée suivant cette ligne, et aussi la grandeur de la résultante que nous cherchons, puisque cette force AF lui est égale et contraire. Mais ABEF étant un parallélogramme, AF est égal à BE ; de plus, à cause du parallélogramme ADBE, le côté BE est égal au côté AD : donc AD est égal à AF, et l'on peut en conclure que AD représente en grandeur la résultante des deux forces AB et AC.



Fig. 28.

Au moyen de ce que nous venons de démontrer, nous sommes en mesure d'énoncer la proposition suivante : *La résultante de deux forces appliquées à un point, suivant des directions différentes, est représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les lignes droites qui représentent les composantes.* Cette proposition est habituellement désignée sous le nom de *parallélogramme des forces.*

§ 35. Il arrive souvent qu'une force étant donnée, on a besoin de la remplacer par deux autres forces agissant suivant des direc-



tions déterminées, et dont elle serait la résultante : c'est ce qu'on appelle décomposer la force donnée en deux composantes, dont les directions sont connues. Cette décomposition se fera facilement à l'aide du parallélogramme des forces. Soit AB (fig. 29) la ligne qui représente la force donnée, appliquée au point A, et qu'il s'agit de décomposer en deux autres forces agissant dans les directions AC et AD. Par le point B on mènera BE parallèle à AD, et BF parallèle à AC, et l'on obtiendra ainsi les lignes AE, AF, qui représenteront les grandeurs des composantes qu'on voulait trouver.



Fig. 29.

§ 36. Lorsqu'un corps sera soumis à l'action de plus de deux forces, appliquées à un même point, suivant des directions différentes, on trouvera la résultante de toutes ces forces de la manière suivante. On composera d'abord deux des forces données en une seule; puis on composera la résultante partielle, ainsi obtenue, avec une troisième des forces données; et l'on continuera ainsi jusqu'à ce que, par des compositions successives, on ait réduit toutes les forces données à une seule, qui sera leur résultante.

DU CENTRE DE GRAVITÉ D'UN CORPS.

§ 37. **Définition du centre de gravité.** — Un corps solide est formé par la réunion d'un grand nombre de molécules placées à côté les unes des autres dans des positions déterminées. Chacune de ces molécules est pesante; elle est soumise à une force agissant verticalement et de haut en bas, que nous appelons son poids. Les poids des différentes molécules, dont l'ensemble constitue un corps solide, sont donc autant de forces appliquées au corps, aux différents points où sont placées ces molécules. A moins que le corps n'ait de très-grandes dimensions, on peut regarder les verticales menées par ses différents points comme parallèles entre elles; toutes les forces dont on vient de parler sont donc parallèles, et ont en conséquence une résultante : c'est cette résultante que nous avons appelée le poids du corps.

Pour trouver la résultante des poids des diverses molécules d'un corps solide, on composera ces poids, conformément à ce qui a été expliqué au § 25, relativement à la composition d'un nombre quelconque de forces parallèles, agissant sur un corps solide, dans un même sens. Imaginons, pour simplifier, que le

corps solide dont nous nous occupons ne contienne que quatre molécules A, B, C, D (fig. 30), dont nous supposerons les poids tous égaux à un milligramme. Les forces appliquées en A et B se composeront en une seule force, de deux milligrammes, appliquée au point E, milieu de la ligne AB. Cette première résultante partielle se composera à son tour avec la force appliquée en C, en une force unique, de trois milligrammes, appliquée en un point F; ce point est situé sur la ligne CE, de telle manière que EF soit la moitié de CF, ou, ce qui revient au même, le tiers de CE. Cette deuxième résultante partielle se composera enfin avec la force appliquée en D, ce qui donnera la résultante définitive de quatre milligrammes, appliquée au point G, situé sur la ligne FD, au quart de cette ligne à partir du point F.



Fig. 30.

Concevons maintenant qu'on retourne le corps composé des molécules A, B, C, D, pour le mettre dans une autre position, sans le déformer, c'est-à-dire sans que les molécules qui le constituent cessent d'être placées de la même manière les unes par rapport aux autres. Le corps ayant été ainsi retourné, nous pourrons répéter la composition des poids des molécules, comme nous venons de l'effectuer dans la première position du corps; et si nous avons soin de composer ces poids dans le même ordre, ainsi que l'indique la figure 31, il est clair que nous retrouverons successivement, pour les points d'application des résultantes partielles et de la résultante définitive, les mêmes points E, F, G, que nous avons trouvés précédemment.



Fig. 31.

Le résultat que nous venons d'obtenir, s'obtiendra évidemment de même, quel que soit le nombre des molécules d'un corps, et aussi quels que soient les poids de ces molécules, qui pourront être égaux ou inégaux. Ce n'est que pour fixer les idées que nous avons réduit à quatre le nombre des molécules, et que nous les avons supposées également pesantes. Dans tous les cas, le point

d'application de la résultante définitive des poids des diverses molécules ne dépendra aucunement de la position qu'on aura donnée au corps : ce point sera toujours placé de la même manière par rapport aux molécules.

Le point dont nous venons de reconnaître l'existence, par lequel passe constamment la résultante des poids des diverses molécules d'un corps, quelle que soit la position qu'on lui aura donnée, se nomme le *centre de gravité* de ce corps.

§ 38. Détermination expérimentale du centre de gravité. — Lorsqu'un corps est suspendu à une corde, par un point de sa surface (fig. 32), il prend une certaine position d'équilibre. La force qui tend à le faire tomber est son poids, et le point d'application de cette force est son centre de gravité. Si le corps ne tombe pas, c'est qu'il éprouve de la part de la corde une traction, dirigée de bas en haut, qui fait équilibre à la première force, et qui doit en conséquence lui être égale et directement opposée. On conclut de là que, si l'on imagine la direction de la corde prolongée à l'intérieur du corps, suivant la ligne AB, cette ligne devra passer par son centre de gravité.

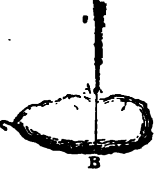
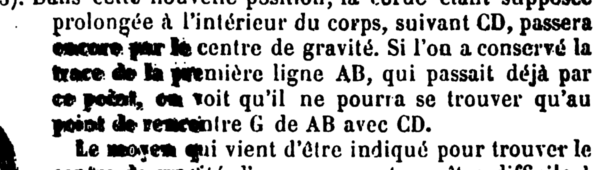


Fig. 32.

Si l'on vient maintenant à suspendre le corps par un autre point de sa surface, il prendra une nouvelle position d'équilibre (fig. 33). Dans cette nouvelle position, la corde étant supposée prolongée à l'intérieur du corps, suivant CD, passera encore par le centre de gravité. Si l'on a conservé la trace de la première ligne AB, qui passait déjà par ce point, on voit qu'il ne pourra se trouver qu'au point de rencontre G de AB avec CD.


Fig. 33.

Le moyen qui vient d'être indiqué pour trouver le centre de gravité d'un corps peut paraître difficile à employer réellement, parce qu'il suppose qu'on ait tracé à l'intérieur du corps les deux lignes AB et CD. Mais s'il ne peut pas conduire à trouver ainsi exactement la position du centre de gravité, il fournira au moins, dans un grand nombre de cas, des indications suffisantes sur la place qu'occupe ce point à l'intérieur du corps. Prenons pour exemple une canne de jonc, garnie à son extrémité supérieure d'une pomme d'ivoire. Cette canne est symétrique tout autour d'un axe qui la traverse dans toute sa longueur : il est clair que son centre de gravité est situé sur cet axe. Pour trouver où il est placé au juste, il suffira de suspendre la canne horizontalement, en l'attachant à une corde, ou bien

en la posant sur l'arête vive d'un corps fixe, comme le montre la figure 34; on cherchera par tâtonnement en quel point la canne doit être appuyée pour se maintenir horizontalement à l'aide de ce seul point d'appui, et l'on en conclura que son centre de gravité est situé au point de l'axe de figure qui se trouve immédiatement au-dessus du point d'appui.



Fig. 34.

§ 39. **Centre de gravité d'un corps homogène.** — Il arrive souvent que la matière dont un corps se compose est répandue uniformément dans toute l'étendue du volume qu'il occupe; en sorte que, si l'on prend dans diverses parties du corps la quantité de matière contenue dans un millimètre cube, par exemple, on trouvera que le poids de cette matière sera toujours le même, quel que soit le point du corps où on l'aura prise. Dans ce cas, la position du centre de gravité ne dépend absolument que de la configuration du corps, et la recherche de ce point se réduit à une question de géométrie.

En géométrie, on appelle centre de figure d'une surface un point tel qu'en menant une ligne droite, comme on voudra, par ce point, et la terminant de part et d'autre à la surface, elle se trouve divisée par le point en deux parties égales. Toutes les fois que la surface d'un corps homogène aura un centre de figure, il est bien évident que ce point sera le centre de gravité du corps. C'est ainsi que le centre de gravité d'un parallélipipède (fig. 35) est au point de rencontre de deux des diagonales; que le centre de gravité d'un cylindre droit (fig. 36) ou oblique (fig. 37) est au milieu de la ligne droite qui joint les centres des deux bases; que le centre de gravité d'une sphère est au centre de cette sphère; que le centre de gravité d'un anneau (fig. 38) est



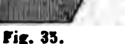


Fig. 35.



Fig. 36.

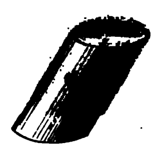


Fig. 37.

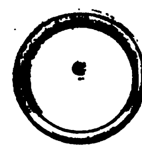


Fig. 38.

au centre de cet anneau. On voit, par ce dernier exemple, que le centre de gravité d'un corps n'est pas nécessairement situé dans la portion de l'espace qui est occupée par la matière du corps.

§ 40. **Centre de gravité d'une surface.** — Quelquefois le corps dont on veut trouver le centre de gravité présente dans toute son étendue une même épaisseur, qui est petite par rap-

port à ses autres dimensions; en sorte que l'on est naturellement porté à faire abstraction de cette épaisseur, et à assimiler le corps à une simple surface. C'est ce qui arrivera, par exemple, pour une planche mince ou une feuille de tôle. Si, de plus, ce corps est homogène, la position de son centre de gravité ne dépendra que de la figure de la surface à laquelle on le suppose réduit. C'est ainsi qu'on est conduit à chercher le centre de gravité d'une surface.



Fig. 29.

On reconnaîtra facilement que le centre de gravité d'un parallélogramme (fig. 39) est au point de rencontre de ses diagonales. On verra de même que celui d'un cercle n'est autre chose que le centre du cercle.

Pour trouver le centre de gravité d'un triangle (fig. 40), nous observerons que la ligne AD, qui joint le sommet A au milieu de la base BC, divise en deux parties égales toutes les lignes, telles que *mn*, menées parallèlement à la base. Imaginons que les molécules dont se compose notre triangle soient rangées régulièrement le long de ces lignes, et que le triangle soit posé sur l'arête vive d'un prisme PQ, de manière à s'appuyer sur cette arête par la ligne AD. Chacune des files de molécules, si elle était seule, se tiendrait en équilibre sur l'arête du prisme, puisqu'elle est supportée par son milieu. Toutes les files étant supposées liées ensemble, de manière à former le triangle, se maintiendront encore en équilibre, et le triangle ne tendra pas à tomber plutôt d'un côté que de l'autre : on en conclut nécessairement que le centre de gravité du triangle est situé sur la ligne AD. On verrait de même qu'il est situé sur la ligne qui joint le sommet B au milieu E du côté AC : donc il se trouve au point G de rencontre de ces deux lignes. On démontre en géométrie que le point G, ainsi obtenu, divise la ligne AD en deux parties, dont l'une AG est double de l'autre GD : on peut donc dire que le centre de gravité d'un triangle est sur la ligne qui joint le sommet au milieu de la base, et au tiers de cette ligne à partir de la base.



Fig. 40.

A l'aide du résultat que nous venons d'obtenir, nous résou-

drons sans peine la question suivante : Trois hommes doivent porter un triangle pesant (fig. 41), en le prenant chacun par un des sommets; quel est celui qui sera le plus chargé, et celui qui le sera le moins? Le poids du triangle, que nous supposerons être de 45^k, est une force appliquée en son centre de gravité G. D'après ce que nous venons de voir, la ligne BG prolongée va passer par le milieu D du côté AC, et la distance BG est le double de la distance GD : nous pouvons donc regarder la force verticale de 45^k, appliquée au point G, comme résultant de la composition d'une force verticale de 15^k appliquée au point B, et d'une autre force verticale de 30^k appliquée au point D. Mais cette dernière force, qui agit au milieu de AC, peut être considérée comme provenant de la composition de deux forces verticales, de chacune 15^k, agissant l'une en A, l'autre en C. Donc le poids du triangle équivaut à trois forces, de 15^k chacune, agissant verticalement aux trois sommets du triangle ; et, par suite, les trois hommes qui porteront le triangle seront également chargés, quelle que soit sa forme.



Fig. 41.

§ 41. **Centre de gravité d'un corps formé par la réunion de plusieurs autres corps.** — Lorsqu'on connaît les centres de gravité et les poids des diverses parties dont un corps est formé, il est facile de trouver le centre de gravité du corps tout entier. Prenons pour exemple deux boulets inégaux, homogènes, fixés l'un à l'autre par une tige cylindrique, également homogène (fig. 42). Supposons que le plus gros des deux boulets pèse 5^k, le plus petit 2^k, et la tige qui les réunit 1^k. Le centre de gravité du corps tout entier est le point d'application de la résultante des poids de ses diverses molécules. On peut d'abord composer entre eux les poids des molécules du gros boulet, ce qui donnera une force de 5^k, appliquée à son centre A ; on composera également entre eux les poids des

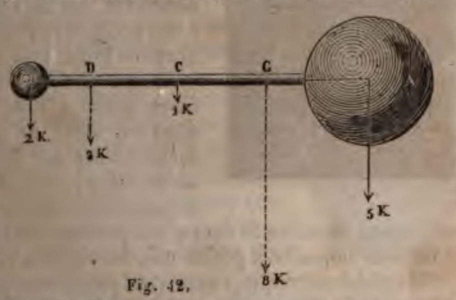


Fig. 42.

molécules du petit boulet, et l'on trouvera une force résultante de 2^k, appliquée au point B, centre de ce petit boulet; enfin la résultante des poids des molécules de la tige qui réunit les deux boulets est une force de 1^k, agissant au point C, milieu de l'axe de cette tige. Il ne reste plus qu'à composer ces trois forces parallèles de 5^k, 2^k et 1^k, appliquées respectivement aux points A, B, C, pour avoir la résultante définitive, dont le point d'application est le centre de gravité que nous voulons trouver. Pour cela on composera les forces de 2^k et 1^k, agissant en B et C, en une seule de 3^k, agissant au point D, qui est tel que DB est la moitié de DC; ensuite on composera la force de 3^k appliquée au point D, avec celle de 5^k appliquée au point A, en une seule force de 8^k, qui agira sur un point G, tel que AG soit les $\frac{3}{5}$ de GD, G sera le centre de gravité du corps tout entier.

§ 42. **Équilibre d'un corps pesant qui repose sur un plan horizontal.** — Lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan horizontal, sur une table ou sur le sol, par exemple, pour qu'il se maintienne dans cette position sans tomber ni d'un côté ni d'un autre, il doit remplir certaines conditions : la considération du centre de gravité va nous permettre de les trouver. Ce corps s'appuie sur le plan par des points A, B, C, D, E, F, G (fig. 43), dont le nombre est souvent très-grand. On peut toujours former avec ces points un polygone convexe tel que ABDEG, c'est-à-dire un polygone qui n'ait pas d'angles rentrants; plusieurs des points d'appui du corps resteront ordinairement à l'intérieur de ce polygone, comme les points C, F, et ne concourront pas à sa formation. L'action de la pesanteur sur le corps se traduit, en définitive, par une force verticale égale à son poids et appliquée à son centre de gravité. Pour peu qu'on y réfléchisse, on verra que, si la direction de cette force passe à l'intérieur du polygone dont on vient de parler, le corps se maintiendra sur le plan sans changer de position; mais que, si elle passe en dehors de ce polygone, elle fera nécessairement basculer le corps, qui prendra ainsi une nouvelle position dans laquelle il puisse être en équilibre.



Fig. 43.

Un cylindre oblique, s'appuyant par sa base sur une table (fig. 44), restera dans cette position, si la verticale qui passe par son centre de gravité vient rencontrer la table à l'intérieur du cercle de base, cercle qui remplace dans ce cas le polygone convexe dont on a parlé il n'y a qu'un instant. Mais si ce cylindre oblique a une plus

grande longueur, il pourra arriver que la verticale passant par son centre de gravité tombe sur la table en dehors du cercle de base

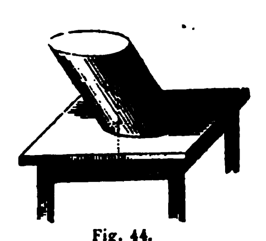



Fig. 44.

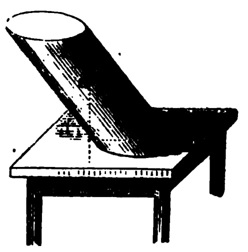


Fig. 45.

(fig. 45), et alors le cylindre ne restera pas dans cette position : il tombera nécessairement sur le côté.

Tout le monde connaît ces jouets d'enfant, qui sont formés d'un morceau de moelle de sureau, au bout duquel on a fixé un bouton métallique. Lorsqu'on les pose sur une table, en les couchant sur le côté (fig. 46), ils se redressent immédiatement pour se placer verticalement. Cela tient à ce que, la moelle de sureau étant extrêmement légère, le centre de gravité d'un pareil corps est situé à l'intérieur du bouton métallique, et que lorsque ce corps est couché sur le côté, la verticale qui passe par son centre de gravité est dirigée en dehors du polygone convexe, formé par ses points d'appui avec la table. La force qui est appliquée au centre de gravité peut alors produire son effet en abaissant ce point, ce qui oblige le corps à se redresser.

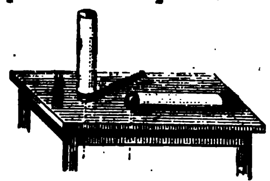


Fig. 46.

Pour qu'un homme qui se tient debout soit en équilibre, il faut que la verticale qui passe par son centre de gravité soit dirigée à l'intérieur du polygone convexe, qu'on peut former avec les points de contact de ses pieds avec le sol. La figure 47 montre la forme de ce polygone, dont toute la surface a été couverte de hachures. Si l'on vient à charger cet homme d'un fardeau un peu lourd, il devra changer de position, afin que le centre de gravité du corps total formé de son corps et du fardeau satisfasse encore à la condition précédente. S'il porte ce fardeau sur son dos, il se penchera en avant; s'il le tient suspendu à côté de lui à l'aide de sa main droite, il se penchera à gauche. Si cet homme veut saisir de la main, sans se déplacer, un

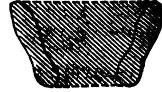
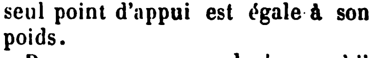


Fig. 47.

objet un peu éloigné, il allongera son bras et penchera son corps du côté de l'objet ; mais en même temps il portera une jambe en arrière, pour maintenir toujours le centre de gravité dans les conditions qui conviennent à l'équilibre.

§ 43. **Pressions supportées par les points d'appui.** — Un corps pesant qui repose sur un plan horizontal exerce des pressions sur ce plan, en chacun de ses points d'appui. Ces pressions peuvent être déterminées, ainsi que nous allons le voir, toutes les fois que le nombre des points d'appui ne surpasse pas trois.

Si le corps s'appuie sur le plan par un seul point, et qu'il soit en équilibre, il est clair que la pression qu'il exerce en ce


seul point d'appui est égale à son poids.

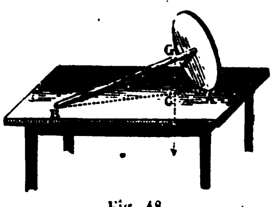
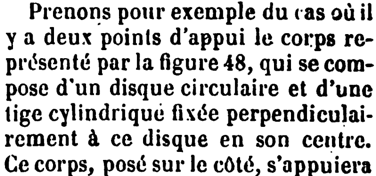


Fig. 48.


Prenons pour exemple du cas où il y a deux points d'appui le corps représenté par la figure 48, qui se compose d'un disque circulaire et d'une tige cylindrique fixée perpendiculairement à ce disque en son centre. Ce corps, posé sur le côté, s'appuiera en deux points A et B, et l'équilibre exige que la verticale, menée par son centre de gravité G, rencontre le plan en un point C de la ligne droite AB. Le poids du corps est une force appliquée suivant la verticale GC; nous pouvons regarder cette force comme provenant de la composition de deux autres forces verticales, appliquées l'une en A, l'autre en B, forces que nous trouverons aisément. Il suffira, en effet, de diviser le poids du corps en deux parties qui soient entre elles dans le rapport des deux distances AC et CB; AC étant plus petit que CB, la plus grande des deux forces partielles ainsi obtenues, sera la composante appliquée au point A, et l'autre sera la composante appliquée au point B. Ces deux composantes seront précisément les pressions que le corps exerce en ses deux points d'appui.

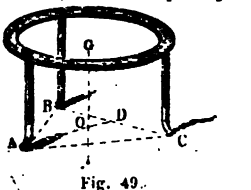


Fig. 49.

S'il s'agit d'un corps reposant sur un plan par trois points A, B, C (fig. 49), on trouvera encore, de la manière suivante, les pressions exercées sur les trois points d'appui. La verticale GO, passant par le centre de gravité G, rencontre le plan en un point O, qui doit être situé à l'intérieur du triangle ABC. Le poids du corps, qui est appliqué en G, peut être regardé comme agissant au point O, et comme provenant de la composition de deux forces verticales

appliquées l'une en A, l'autre en D. Cette dernière force peut elle-même être décomposée en deux forces verticales, agissant l'une en B, l'autre en C : en sorte qu'on aura trouvé ainsi trois forces verticales, dont les points d'application sont A, B, C, et qui ont pour résultante le poids du corps. Ces trois forces sont les pressions supportées par les points d'appui A, B, C.

Lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan par plus de trois points, il n'est plus possible de déterminer les pressions qu'il exerce en ses points d'appui par la seule connaissance de la position de son centre de gravité; l'exemple suivant le fera bien comprendre. Une table (fig. 50), posée sur un parquet, s'y appuie par quatre points A, B, C, D. Imaginons que le parquet soit solide en A et D, tandis qu'en B et C il fléchisse sous la moindre pression; il est bien clair que le poids de la table portera presque tout entier sur les points A et D, et que les points B et C ne supporteront qu'une pression très-faible. Si, au contraire, le parquet était solide en B et C, et flexible en A et D, la table exercerait en B et C des pressions beaucoup plus fortes qu'en A et D.

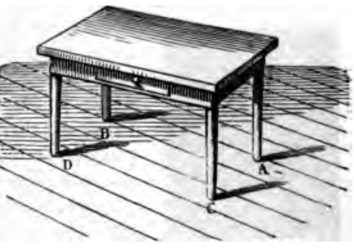


Fig. 50.

Tout ce qu'on peut dire, en général, pour le cas où un corps pesant repose sur un plan horizontal par plus de trois points, c'est que la somme des pressions exercées sur les points d'appui est égale au poids du corps; mais on ne peut, en aucune manière, assigner la valeur de chacune d'elles.

§ 44. **Équilibre d'un corps pesant qui ne peut que tourner autour d'un axe horizontal.** — Lorsqu'un corps solide ne peut se mouvoir qu'en tournant autour d'un axe horizontal, comme une roue hydraulique ou une meule de rémouleur, la position de son centre de gravité joue un rôle important. Si ce point est situé exactement sur la ligne droite idéale autour de laquelle peut s'effectuer le mouvement de rotation, le corps restera en équilibre dans toutes les positions qu'on pourra lui donner autour de l'axe; l'action de la pesanteur ne tendra nullement à le faire tourner pour le ramener dans une autre position d'équilibre. On voit, en effet, que cette action se réduisant en définitive à une force appliquée au centre de gravité, la direction de cette force, la seule qu'on suppose appliquée au corps, rencontrera

toujours l'axe de rotation, et que cette force ne pourra, en conséquence, faire tourner le corps ni d'un côté ni de l'autre; elle sera détruite par la fixité de l'axe, et ne fera qu'appuyer le corps sur ses supports.

Si, au contraire, le centre de gravité n'est pas situé sur l'axe de rotation, le corps, soumis à la seule action de la pesanteur, ne pourra se maintenir en équilibre que dans deux positions différentes. Lorsqu'on le fait tourner, son centre de gravité décrit une circonférence de cercle (fig. 51), dont le centre est situé sur l'axe de rotation. Il pourra se maintenir en équilibre dans chacune des positions pour lesquelles ce centre de gravité sera au point le plus bas A, ou au point le plus élevé B de cette circonférence : la direction de la force qui lui est appliquée rencontrant l'axe, cette force ne tendra pas plus à le faire tourner à droite qu'à gauche. Mais toutes les fois que le centre de gravité sera ailleurs qu'en un de ces deux points, la force qui lui est appliquée tendra constamment à l'abaisser, en faisant tourner le corps soit à droite, soit à gauche. On voit par là que le centre de gravité doit être en A ou en B, pour que le corps ne tende pas à tourner, sous la seule action de la pesanteur; et que l'équilibre sera stable, si le centre de gravité est en A, instable, s'il est en B.



Fig. 51.

Pour que l'action de la pesanteur ne gêne en rien le mouvement de rotation qu'on veut donner à un corps autour d'un axe horizontal, on doit donc faire en sorte que son centre de gravité soit situé exactement sur cet axe. C'est ce qu'on fait, par exemple, pour les aiguilles des horloges de grandes dimensions : l'aiguille présente souvent, au delà du centre du cadran, un prolongement court, mais pesant, qu'on a déterminé de manière que le centre de gravité de l'aiguille tout entière soit situé sur l'axe; souvent aussi, afin que l'aiguille ne s'étende pas des deux côtés du centre du cadran, on fixe à la tige qui lui sert d'axe, en arrière du cadran, un contre-poids destiné à produire le même effet. Dans les ateliers où l'on tourne de grosses pièces de fonte ou de fer, on adapte à ces pièces, lorsqu'elles sont montées sur le tour, des masses additionnelles qui ont encore pour objet de ramener le centre de gravité sur l'axe de rotation.

ÉTUDE DE DIVERSES MACHINES, SOUS LE POINT DE VUE DE L'ÉQUILIBRE DES FORCES QUI LEUR SONT APPLIQUÉES.

§ 45. **Pression d'un levier sur son point d'appui.** — Nous

avons vu déjà, dans les paragraphes 28, 29 et 30, à quelle condition doivent satisfaire les forces qui sont appliquées à un levier, pour qu'il soit en équilibre; cherchons maintenant à déterminer la grandeur et la direction de la pression qu'il exerce sur son point d'appui.

Dans le cas du levier droit, représenté par la figure 20 (page 21), les deux forces parallèles appliquées aux points A et B auront une résultante égale à leur somme, parallèle à chacune d'elles, et passant par le point C; cette résultante est la pression que le levier exerce sur son point d'appui C.

Pour le levier droit, soumis à deux forces parallèles et de sens contraires (fig. 23, page 23), on peut regarder la force appliquée au point B comme résultant de la composition de deux forces parallèles appliquées, l'une au point A, l'autre au point C. La première serait égale et contraire à la force qui agit au point A du levier, et serait détruite par cette force; la seconde serait égale à la différence entre la force qui agit au point B et celle qui agit au point A : c'est cette seconde composante qui représente la pression exercée par le levier sur son point d'appui.

Si un levier, droit ou coudé, est soumis à l'action de deux forces qui ne sont pas parallèles, il ne pourra être en équilibre qu'autant que les directions de ces deux forces se rencontreront en un point D (fig. 52) et que leurs grandeurs satisferont à la condition énoncée précédemment (§ 29). Ces forces auront une résultante, qu'on obtiendra en construisant le parallélogramme DEGF, et qui sera nécessairement dirigée vers le point d'appui C du levier : car, sans cela, elle tendrait à faire tourner le levier autour de ce point, soit à droite, soit à gauche. Cette résultante, représentée par la diagonale DG, n'est autre chose que la pression que le levier exerce sur son point d'appui. On voit que, si l'on mène par le point C deux lignes CH et CK, respectivement égales et parallèles aux lignes qui représentent les forces appliquées aux points A et B, la diagonale CL du parallélogramme construit sur ces deux lignes aura la même grandeur et la même direction que la ligne DG; elle représentera donc, aussi bien que cette dernière ligne, la pression supportée par le point d'appui. C'est ordinairement ainsi, en construisant le paral-



Fig. 52.

lélogramme CHKL, qu'on détermine la pression supportée par le point d'appui.

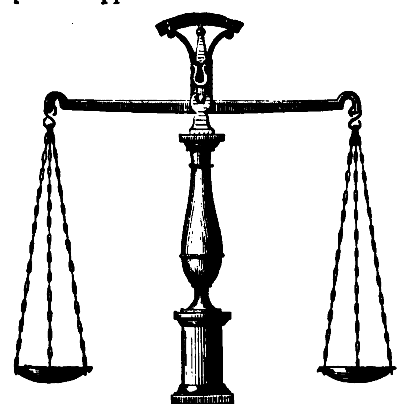


Fig. 53.

§ 46. **Balance.** — La balance est un instrument qui sert à peser les corps, c'est-à-dire à déterminer le nombre de grammes ou de kilogrammes qui représente le poids de chacun d'eux. Elle se compose essentiellement d'un levier, nommé *fléau*, dont le point d'appui est au milieu de sa longueur, et dont les extrémités supportent deux plateaux (fig. 53). Il est nécessaire que le fléau soit très-mobile autour de son point d'appui, et que ce point reste toujours exactement au milieu de sa longueur, pendant qu'il oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre. Pour cela, il est muni d'un couteau d'acier, qui lui est fixé transversalement en son milieu, et qui fait saillie des deux côtés : ce couteau présente une arête déliée, mais non tranchante, tournée vers le bas, et par laquelle il s'appuie sur deux petits plans d'acier, ou d'agate, disposés horizontalement, l'un en avant du fléau, l'autre en arrière, et fixés à un pied solide. Les oscillations du fléau s'effectuent autour de cette arête, qui fait fonction d'axe de rotation.

Les deux extrémités du fléau présentent deux couteaux analogues à celui qui vient d'être décrit, mais disposés de manière à tourner leurs arêtes vers le haut : c'est sur ces deux arêtes que viennent s'appuyer les crochets auxquels sont fixées les chaînes qui supportent les plateaux.

On se sert de la balance en plaçant dans un des plateaux le corps qu'on veut peser, et dans l'autre des poids marqués, en quantité suffisante pour établir l'équilibre, c'est-à-dire pour que le fléau se maintienne horizontal. Il suffit alors, si la balance est juste, de compter le nombre de grammes ou de kilogrammes que représentent les poids marqués qu'on a employés, et l'on a ainsi le poids du corps. Pour qu'une balance soit juste, il faut qu'elle remplisse deux conditions : 1° les distances du point d'appui du fléau aux points de suspension des plateaux doivent être égales ;

2° lorsque aucun corps n'est placé dans les plateaux, le fléau doit être horizontal. On voit en effet que, ces conditions étant remplies, si le fléau reste horizontal, lorsqu'on aura mis deux corps dans les plateaux, les poids de ces deux corps devront être égaux : puisque ces poids sont deux forces qui se font équilibre, en agissant sur le fléau, aux extrémités de deux bras de levier égaux.

On se contente souvent, pour s'assurer de la justesse d'une balance, de vérifier si la seconde des conditions précédentes est remplie; mais cela ne suffit pas. La balance peut être très-inexacte, quoique cette vérification ait réussi, parce qu'elle ne prouve en aucune manière l'égalité des bras de levier du fléau. Pour être certain que la balance est juste, on opérera de la manière suivante. Après avoir reconnu que le fléau se maintient bien horizontalement, lorsque les plateaux ne renferment aucun corps, on mettra dans ces plateaux des poids tellement choisis que le fléau reste horizontal ; on changera ensuite ces poids de place, en mettant dans le plateau de gauche le poids qui était dans le plateau de droite, et inversement, et si le fléau ne cesse pas d'être horizontal, on sera sûr que la balance est exacte. Si les bras de levier du fléau étaient inégaux, les poids qu'on a mis dans les plateaux, et qui se faisaient équilibre en agissant aux extrémités de ces bras de levier, devaient être aussi inégaux, le plus grand agissant sur le petit bras de levier, et le plus petit sur le grand bras de levier. En changeant ces poids de place, on aurait ainsi appliqué le plus grand au grand bras de levier, le plus petit au petit bras de levier : ces poids n'auraient donc pas pu se faire équilibre, dans leur nouvelle position, et le fléau ne serait pas resté horizontal.

§ 47. **Sensibilité d'une balance.** — Pour qu'une balance puisse servir à déterminer très-exactement le poids d'un corps, il ne suffit pas qu'elle soit juste, il faut encore qu'elle soit très-sensible ; c'est-à-dire que, lorsque le fléau se maintient horizontalement, sous l'action de deux poids égaux placés dans les plateaux, si l'on vient à ajouter, d'un côté seulement, un très-petit poids, un milligramme, par exemple, le fléau doit se déplacer immédiatement pour prendre une nouvelle position d'équilibre, visiblement différente de celle qu'il occupait. En outre, une bonne balance doit présenter le même degré de sensibilité, quels que soient les poids des corps placés dans ses deux plateaux. Pour qu'il en soit ainsi, la balance doit satisfaire aux conditions suivantes : 1° le point d'appui du fléau et les points de suspension des plateaux doivent être en ligne droite ; 2° le centre

de gravité du fléau doit être au-dessous de son point d'appui, et très-près de ce point.

On voit en effet que, quels que soient les poids égaux qu'on aura mis dans les deux plateaux, les poids de ces plateaux, ainsi chargés, seront deux forces égales appliquées aux deux points A et B de suspension (fig. 54) : ces deux forces auront une résultante passant par le point d'appui C du fléau, résultante qui sera détruite par la fixité de ce point, quelle que soit la direction de la ligne AB, horizontale ou oblique. Le fléau se trouvera donc dans les mêmes conditions que si les plateaux n'étaient pas suspendus à ses extrémités, et il ne prendra une position horizontale que sous l'action de son poids, appliqué à son centre de gravité G. Une différence d'un gramme, par exemple, entre les poids des corps mis dans les plateaux, produira donc le même effet que si le fléau était simplement soumis à une force d'un gramme, appliquée à une de ses extrémités A : sous l'action de cette force, il s'inclinera, et ne s'arrêtera dans une position A′ B′, que quand son poids, appliqué à son centre de gravité G′, fera équilibre à la force qui l'a dérangé de sa première position. On comprend aisément par là qu'une même différence entre les poids des corps mis dans les plateaux produira toujours une même inclinaison du fléau, quels que soient ces poids ; et que cette inclinaison sera d'autant plus marquée que le centre de gravité G du fléau sera plus près de son point d'appui C.



Fig. 54.

Une balance qui remplit les conditions qu'on vient d'énoncer cessera cependant d'être sensible, lorsqu'on changera ses plateaux de corps très-pesants : parce que, d'une part, le fléau fléchira, et les points A, B et C ne seront plus en ligne droite ; et que, d'une autre part, les arêtes des couteaux de suspension se déformeront, sous la pression très-grande qu'elles auront à supporter, ce qui diminuera beaucoup la mobilité du fléau.

En cherchant à atténuer autant que possible ces deux effets, on parvient à obtenir des balances capables de peser, avec précision, des corps dont les poids varient entre des limites très-étendues. C'est ainsi que M. Deleuil a construit une balance qui est sensible à l'addition d'un milligramme dans un des plateaux, même lorsque ces plateaux contiennent des poids de 10 kilogrammes chacun.

Lorsqu'une balance est très-sensible, l'addition d'un très-petit

poids dans un des plateaux la dérange de sa position d'équilibre; mais elle ne s'arrête à une autre position qu'après avoir effectué une série d'oscillations, de part et d'autre de cette nouvelle position d'équilibre. Pour qu'on ne soit pas obligé d'attendre que les oscillations aient cessé, ce qui pourrait être long, on fixe au fléau une aiguille qui oscille en même temps que lui, et dont l'extrémité se meut le long d'un arc de cercle divisé; lorsqu'on voit que l'aiguille, en oscillant, s'écarte également de chaque côté du point de cet arc de cercle qui correspond à l'horizontalité du fléau, on est sûr que les poids mis dans les plateaux sont égaux, et l'on n'a pas besoin d'attendre que le fléau soit immobile, pour reconnaître s'il est horizontal.

§ 48. **Méthode des doubles pesées.** — Quand on veut effectuer des pesées très-exactes, on emploie toujours une méthode due à Borda, et connue sous le nom de *méthode des doubles pesées*. Voici en quoi elle consiste.

Après avoir mis le corps à peser dans un des plateaux d'une balance, on lui fait équilibre, en mettant dans l'autre plateau de la grenaille de plomb ou du sable. L'équilibre étant bien établi, on enlève le corps et on le remplace par des poids marqués, en quantité suffisante pour que le fléau reprenne la position horizontale, ou du moins pour qu'il oscille également de part et d'autre de cette position. Il est bien clair que ces poids marqués, produisant exactement le même effet que le corps, dans les mêmes circonstances, doivent servir de mesure à son poids.

Dans l'emploi de cette méthode ingénieuse, on voit que l'exactitude du résultat ne dépend nullement de la justesse de la balance, mais seulement de sa sensibilité. Une mauvaise balance, pourvu qu'elle soit sensible, pourra ainsi servir à effectuer des pesées très-délicates.

§ 49. **Balance de Quintenz.** — La *balance de Quintenz*, ainsi appelée du nom de son inventeur, est beaucoup employée dans le commerce, et pour peser les bagages, dans les bureaux des messageries ou des chemins de fer. Cette balance est aussi souvent désignée sous le nom de *bascule*. Elle est représentée par la figure 55. La figure 56 est destinée à en montrer le mécanisme d'une manière plus claire.

Un plateau AB, dont un des bords se relève en BC, est destiné à recevoir les corps qu'on veut peser. Ce plateau, qui fait corps avec la pièce D, s'appuie d'une part en E sur le levier FG, et d'une autre part, en H, il est accroché dans l'anneau qui termine inférieurement la tringle HK. Le levier FG, mobile autour du point F, s'appuie sur l'extrémité inférieure de la tringle GL.

Les deux tringles HK et GL s'appuient à leur tour sur le levier LN, mobile autour du point M; et ce levier supporte en N un

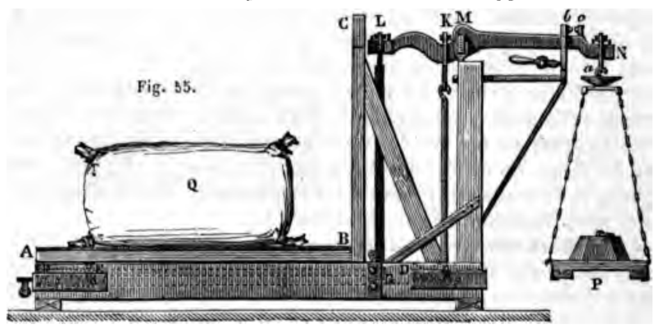


Fig. 55.

plateau P, destiné à recevoir des poids marqués. Les choses sont disposées de manière que le rapport de EF à GF soit le même que le rapport de KM à LM : EF sera par exemple le cinquième de GF, et KM sera aussi le cinquième de LM. En outre, la distance KM est ordinairement égale au dixième de la distance MN.

Admettons que, le plateau AB ne portant aucun corps, le levier LN soit en équilibre sous l'action de son propre poids, du poids du plateau P, et des pressions exercées en K et L par les tiges qui s'y appuient, pressions qui proviennent des poids de diverses parties de l'appareil. Si l'on place un corps Q sur le plateau AB, le poids de ce corps se répartira entre les deux points d'appui E, H du plateau. La portion de ce poids qui agira au point H donnera lieu à une pression égale appliquée en K au levier LN. L'autre portion de ce poids, agissant au point E du levier FG, exercera, par l'intermédiaire de ce levier, une pression cinq fois plus petite sur l'extrémité inférieure G de la tringle GL ; cette pression, qui se transmettra sans changer de grandeur au point L du levier LN, produira sur ce levier le même effet qu'une pres-

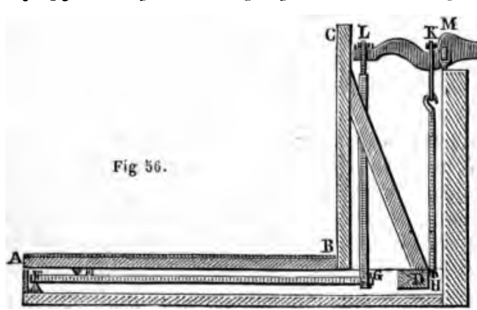


Fig 56.

sion cinq fois plus grande agissant au point K : en sorte que ce sera exactement comme si la seconde portion du poids Q agissait directement sur le point K. Le levier LN se trouve donc dans les mêmes conditions que si le poids du corps Q était appliqué tout entier en K; et, pour lui faire équilibre, il faudra mettre dans le plateau P un poids dix fois plus petit.

Pour se servir de cette balance, on doit d'abord s'assurer, avant de mettre aucun corps sur le plateau AB, que le levier LN se tient horizontalement. On est ordinairement obligé pour cela de mettre certains poids dans le plateau P; ces poids forment ce que l'on appelle la *tare* : pour ne pas les confondre avec les nouveaux poids qu'on aura besoin d'ajouter dans ce plateau, on les met habituellement dans une petite cuvette *a*, disposée au-dessus des chaînes qui le supportent. On reconnaît d'ailleurs l'horizontalité du levier LN, à l'aide de deux appendices saillants *b*, *c*, dont l'un est fixe, et l'autre, mobile avec le levier, doit venir se placer en regard du premier. Lorsque ensuite on aura mis un corps sur le plateau AB, et qu'on aura établi l'équilibre, à l'aide de poids marqués placés dans le plateau P, il suffira de prendre dix fois le nombre de grammes ou de kilogrammes qu'ils représentent, pour avoir le poids du corps.

§ 50. **Balance romaine.** — La *balance romaine* est très-commode, en ce qu'elle n'exige pas l'emploi de poids marqués. Elle consiste en un levier AB (fig. 57) suspendu par le point C,

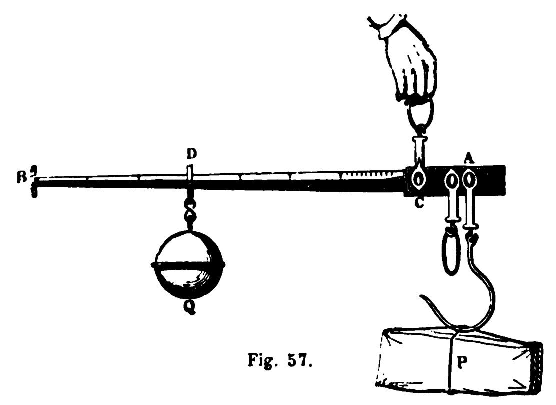


Fig. 57.

et mobile autour de ce point. Au point A est disposé un crochet, quelquefois un plateau. Un anneau D, qui peut glisser le long de CB, supporte un poids Q. Lorsqu'on a suspendu un corps P au

crochet, on fait glisser l'anneau D, jusqu'à ce que le levier AB reste horizontal. La position de cet anneau, dépendant du poids du corps, peut servir à le déterminer : il suffit pour cela qu'on ait gradué d'avance la partie BC du levier, c'est-à-dire qu'on ait marqué les points où s'arrête l'anneau, lorsque le corps suspendu au crochet pèse 1^k, 2^k, 3^k, etc.

La balance romaine est souvent munie de deux anneaux de suspension, comme le montre la figure 57 ; alors le crochet, qui doit supporter le corps à peser, peut tourner autour de l'extrémité du levier, de manière à se diriger toujours vers le bas, quel que soit celui des deux anneaux de suspension dont on se serve. Quand on veut peser des corps peu lourds, on suspend la balance par l'anneau le plus éloigné du point A, comme dans la figure 57; mais, pour peser des corps dont le poids est un peu grand, on retourne l'instrument, pour le suspendre par l'autre anneau, afin de donner un plus petit bras de levier à ce poids.

§ 51. **Peson.** — Le *peson* est destiné, comme la balance romaine, à déterminer le poids d'un corps sans l'emploi d'aucun poids marqué. La figure 58 représente un peson de petites dimensions, disposé spécialement pour peser les lettres, et qui est désigné pour cela sous le nom de *pèse-lettre*. Le levier coudé ACB peut tourner autour du point C. Le centre de gravité G de ce levier tend à venir se placer sur la verticale qui passe par le centre de rotation C : mais il en est éloigné par l'action du poids d'un plateau E suspendu au point A. Lorsqu'on charge ce plateau, le levier tourne, et l'extrémité B se meut sur un arc de cercle ; cet arc a été gradué d'avance, en sorte qu'on sait, pour chaque position du point B, quel est le poids du corps qui a été posé sur le plateau. Le renflement D que porte le levier coudé, a pour objet de placer le centre de gravité à une distance suffisamment grande du centre de rotation.

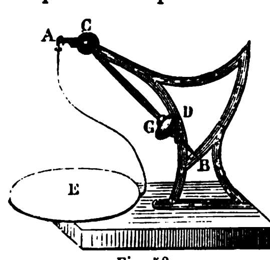


Fig. 58.

§ 52. **Poulie.** — La *poulie* est un disque circulaire, qui présente sur sa tranche, dans tout son contour, une rainure qu'on nomme sa *gorge*, et qui peut tourner librement autour d'un axe qui le traverse en son milieu. L'axe peut être fixé à la poulie, et alors ses deux extrémités tournent dans deux ouvertures circulaires pratiquées dans une *chape* qui embrasse la poulie; ou bien l'axe est fixé à la chape, et il traverse une ouverture circulaire percée au centre de la poulie, qui peut

ainsi tourner indépendamment de cet axe. Une corde s'engage dans la gorge de la poulie, s'applique sur une portion de son contour, et s'en détache ensuite de part et d'autre, suivant les directions de deux tangentes à sa circonférence.

La figure 59 représente une poulie dont la chape est attachée à un point fixe ; la corde qui passe dans sa gorge supporte un poids à une de ses extrémités, et à l'autre extrémité est appliquée une force de traction qui doit maintenir ce poids en équilibre. Les deux forces qui agissent suivant les deux parties rectilignes de la corde, sont dans les mêmes conditions que si elles agissaient aux deux extrémités d'un levier coudé formé des rayons qui joignent le centre de la poulie aux points de contact A et B des deux cordons avec sa circonférence : et comme les deux bras de ce levier sont égaux, il s'ensuit que la force de traction doit être égale au poids du corps qu'elle maintient en équilibre.

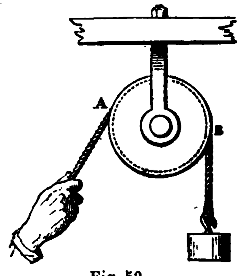


Fig. 59.

La poulie peut être encore employée comme l'indiquent les figures 60 et 61. La chape est alors munie d'un crochet auquel on

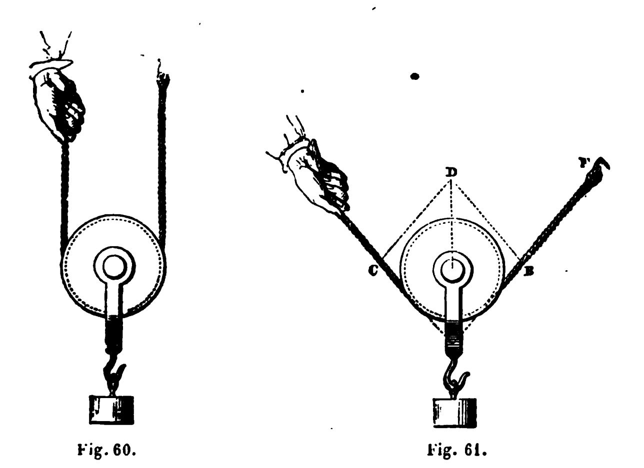


Fig. 60. Fig. 61.

peut suspendre un poids. Une des extrémités de la corde est fixée à un point F, et à l'autre extrémité est appliquée une force de

traction. L'équilibre étant établi, les deux cordons qui se détachent de la poulie, de part et d'autre, doivent être également tendus, et la résultante de leurs tensions doit être égale au poids du corps que la poulie supporte. Dans le cas de la figure 60 la force de traction sera donc la moitié de ce poids. Dans le cas de la figure 61, on prolongera les deux cordons jusqu'à leur rencontre en A ; on mènera par ce point une verticale, sur laquelle on prendra une longueur AD représentant le poids dont la poulie est chargée ; enfin on mènera DB, DC parallèles aux deux cordons : les lignes AB, AC ainsi obtenues représenteront les tensions des deux cordons, et la force de traction sera égale à l'une d'elles. Les tensions des cordons étant égales, il en résulte que les lignes AB, AC devront avoir la même longueur, et par suite que les deux cordons devront être également inclinés sur la verticale AD.

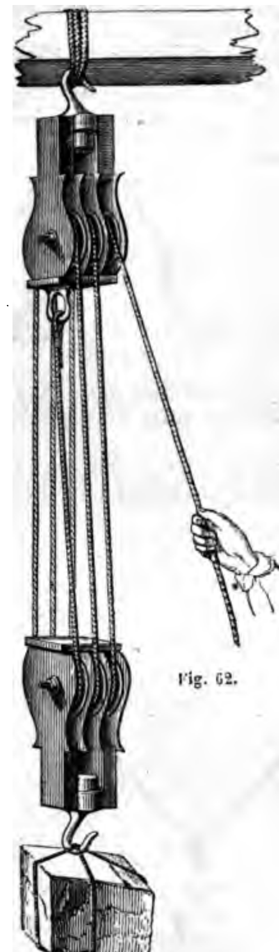


Fig. 62.

§ 53. **Moufles.** — Les *moufles* sont des machines formées par la réunion de plusieurs poulies sur une même chape. La figure 62 représente un système de moufles dont chacune est formée de trois poulies tournant autour d'un même axe : chaque poulie tourne d'ailleurs indépendamment des autres. La chape de la moufle supérieure est fixée à l'aide du crochet qui la termine. Une corde s'attache par une de ses extrémités à cette chape ; de là elle descend et passe dans la gorge d'une des poulies inférieures ; puis elle remonte, et passe dans la gorge d'une des poulies supérieures ; elle redescend ensuite, pour passer dans la gorge d'une seconde poulie inférieure, et ainsi de suite, jusqu'à ce que, ayant embrassé les gorges des diverses poulies, elle

se détache de la dernière poulie supérieure. A la seconde extrémité de cette corde est appliquée une force de traction, destinée à mettre en équilibre le poids du corps que l'on suspend au crochet de la moufle inférieure.

Si l'on suit la corde dans toute sa longueur, on verra qu'elle a partout la même tension, puisque les cordons qui se détachent d'une poulie sont toujours également tendus. D'ailleurs six cordons, qu'on peut regarder comme parallèles, soutiennent la moufle inférieure : la tension de chacun d'eux sera donc la sixième partie du poids du corps qui est suspendu à cette moufle. La force de traction qui est appliquée à l'extrémité libre de la corde, et qui détermine cette tension, aura donc la même valeur, c'est-à-dire qu'elle sera six fois plus petite que le poids auquel elle fait équilibre.

A l'aide des moufles, comme à l'aide du levier, on peut, avec une force donnée, faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on voudra. Il suffira pour cela de réunir dans chaque moufle un assez grand nombre de poulies; car on voit que, pour avoir la grandeur de la force capable de vaincre une résistance, il faut diviser cette résistance par le nombre total des poulies employées.

§ 54. **Tour, ou Treuil.** — Lorsqu'on veut élever un corps pesant à une certaine hauteur, on se sert souvent de la machine désignée sous le nom de *tour*, ou *treuil*. Elle consiste en un cylindre A (fig. 63), quelquefois de fonte, mais plus ordinairement de bois, qui est terminé à ses deux extrémités par deux *tourillons* B, reposant dans des *coussinets* fixes C.

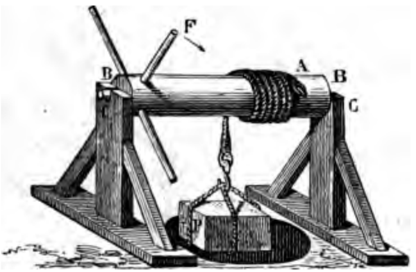


Fig. 63.

Le cylindre, qui n'est appuyé que par ses tourillons, peut tourner autour de son axe. Une corde, dont un bout est fixé sur le contour du cylindre, est attachée par son autre bout au corps P, qu'il s'agit d'élever. On fait tourner le cylindre, en agissant aux extrémités de leviers qui lui sont fixés ou bien qu'on introduit successivement dans des trous pratiqués sur son contour; la corde s'enroule, et elle fait monter le corps auquel elle est attachée.

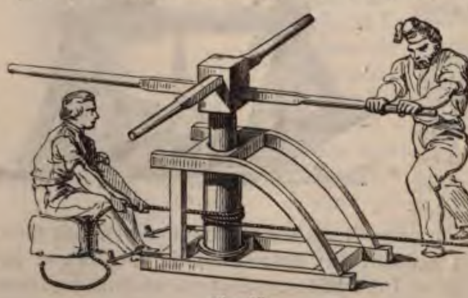
Pour trouver la relation qui existe entre le poids du corps qui

monte et la force qui le fait monter, nous observerons qu'il importe peu que le levier sur lequel agit la force soit implanté en tel point ou en tel autre point de la surface du tour; pourvu que ce levier conserve la même longueur, et que la force lui soit appliquée au même point, et perpendiculairement à sa longueur, cette force devra toujours avoir la même intensité pour soulever le poids. Nous pourrons donc admettre, pour simplifier, que la corde qui supporte le poids, et le levier sur lequel agit la force, soient situés dans un même plan perpendiculaire à l'axe du tour. Dès lors les deux forces P et F (fig. 64) se trouvent évidemment dans les mêmes conditions que si elles étaient appliquées aux deux extrémités du levier coudé MON; c'est-à-dire que, pour qu'il y ait équilibre, elles doivent être dans le rapport inverse du rayon OM du tour, et de la longueur ON du levier. Si, par exemple, ON est égale à cinq fois OM, la force F devra être la cinquième partie du poids P.



Fig. 64.

§ 55. **Cabestan.** — Le *cabestan* est un tour dont l'axe est placé verticalement (fig. 65), et qui est employé surtout dans les ports de mer, pour exercer de très-grands efforts dans une direction horizontale ou presque horizontale. Le tourillon supérieur se prolonge au-dessus du coussinet dans lequel il tourne, et c'est à ce prolongement que sont adaptés quatre, six, ou même huit leviers, disposés régulièrement sur son contour. La charpente qui porte les deux coussinets, et qui est simplement posée sur le sol, doit rester immobile pendant la manœuvre du cabestan : à cet effet elle est reliée par des cordes à des piquets solidement enfoncés en terre. Comme le tour est ordinairement très-peu élevé, et que le câble sur lequel on doit exercer une force de traction est souvent très-long, il serait difficile d'opérer, comme on l'a dit dans le


Fig. 65.

paragraphe précédent, en enroulant le câble de plus en plus sur la surface du tour : aussi agit-on autrement. On fait faire au câble deux ou trois fois le tour du cylindre, puis on en remet l'extrémité libre entre les mains d'un homme (fig. 65) qui la tire avec une force suffisante pour empêcher le câble de glisser. De cette manière, lorsque des hommes agissent sur les extrémités des leviers, pour faire tourner le cabestan, le câble est entraîné par simple adhérence, et tandis qu'il s'enroule d'un côté, il se déroule de l'autre; il n'y a donc jamais que la même quantité de câble qui soit enroulée. Pour faciliter l'adhérence du câble sur la surface du tour, et présenter un plus grand obstacle à ce qu'il puisse glisser, on pratique souvent des cannelures longitudinales sur cette surface.

Quant à la relation qui existe entre la résistance vaincue et la force appliquée à l'extrémité d'un des leviers pour vaincre cette résistance, on la trouvera de même que lorsqu'il s'agissait d'un tour à axe horizontal. On observera seulement que la force de traction exercée par l'homme qui tient la partie du câble qui se déroule fait équilibre à une portion égale de la résistance totale à vaincre; l'excédant de cette résistance sera mis en équilibre par une force 8, 10 ou 12 fois plus petite, agissant à l'extrémité d'un des leviers, si ce levier est 8, 10 ou 12 fois plus long que le rayon du tour. Si, au lieu d'un seul homme agissant sur un des leviers, il y en a plusieurs qui poussent autant de leviers, ils n'auront à eux tous à exercer que la même pression totale; c'est-à-dire que la somme des forces qu'ils appliqueront aux différents leviers sera égale à la force que devrait appliquer un seul homme pour vaincre la même résistance.

§ 56. **Roue à chevilles.** — Pour extraire des pierres de carrières souterraines qui communiquent par des puits verticaux avec la surface du sol, on emploie fréquemment des treuils, sur lesquels on agit à l'aide de grandes roues à chevilles, au lieu de leviers (fig. 66). On voit un grand nombre de ces roues aux environs de Paris.

Pour manœuvrer cette machine, plusieurs ouvriers montent sur les chevilles, comme sur une échelle; le poids de leur corps force la roue à tourner; la pierre monte, et lorsqu'elle est arrivée au-dessus de l'orifice du puits, un ouvrier recouvre cet orifice de forts madriers sur lesquels on la laisse redescendre.

Entrons dans quelques détails sur l'action des forces dans cette machine. Lorsqu'un homme exerce une pression ou une traction pour vaincre une résistance, il développe une force plus ou moins grande, suivant la grandeur de cette résistance. Ici il n'en est

pas de même; la force provenant de l'action d'un homme sur la roue est le poids de son corps, et il n'est pas libre de faire va-



Fig. 66.

rier cette force à volonté; mais il peut faire varier le bras de levier sur lequel elle agit, et c'est ainsi qu'il parvient à faire équilibre au poids qu'il veut soulever. Admettons, pour simplifier, qu'un seul ouvrier monte sur les chevilles de la roue, et que son poids suffise pour élever la pierre suspendue au câble. On voit que, lorsque l'ouvrier est au point A (fig. 67), son poids doit être regardé comme agissant sur le bras de levier ON : en sorte que ce bras de levier augmente, si l'ouvrier s'élève

de A en B. On conçoit donc qu'il puisse se placer sur la roue, de manière à faire équilibre au poids de la pierre : il faudra pour cela que son poids et le poids de la pierre soient inversement proportionnels aux bras de levier ON et OM. Soit A la position que doit occuper l'ouvrier, pour que l'équilibre ait lieu. S'il monte en B, le bras de levier sur lequel il agit augmente; son poids, qui n'a pas diminué, se trouve trop fort pour faire encore équilibre à la résistance : une portion seulement de son poids est employée à produire cet équilibre, et l'autre portion détermine le mouvement de la roue dans le sens de la flèche *f*. L'ouvrier se trouve donc ramené en A; s'il continue à monter, la roue ne cessera pas de tourner, et la pierre sera ainsi élevée jusqu'au-dessus du puits.

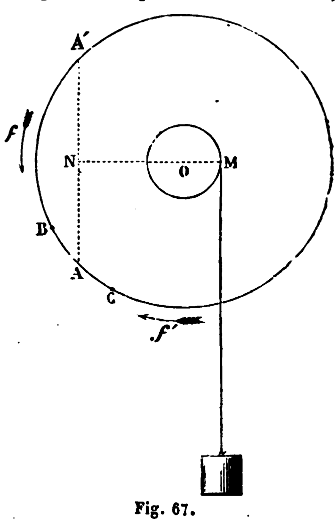


Fig. 67.

Si l'ouvrier, au lieu de monter, descendait de A en C, le bras de levier sur lequel il agirait diminuerait de longueur, son poids ne serait plus assez fort pour faire équilibre à la pierre, et la roue prendrait un mouvement contraire, dans le sens de la flèche *f'*, ce qui le ramènerait encore en A. On voit donc que le point A est une position d'équilibre stable pour l'ouvrier; puisque, s'il s'en éloigne, soit en montant, soit en descendant, la roue prend toujours un mouvement en vertu duquel il est ramené en ce point A.

Si l'ouvrier se place en A', son poids fera aussi bien équilibre au poids de la pierre que lorsqu'il est en A, puisque son bras de levier sera la même ligne ON. Mais l'équilibre sera instable : que l'ouvrier monte ou descende sur la roue, à partir du point A', la roue prendra un mouvement qui l'en éloignera de plus en plus. La stabilité de l'équilibre qui a lieu, lorsque l'ouvrier est au point A, est d'une très-grande importance, en ce qu'elle prévient les accidents graves qui se produiraient si la roue était entraînée par le poids de la pierre, et emportait l'ouvrier dans son mouvement; aussi, pour conserver les avantages de cette

stabilité, doit-on faire en sorte que le point A soit notablement plus bas que l'axe du treuil, car elle pourrait devenir inefficace, si ce point n'était que très-peu inférieur à l'axe.

§ 57. **Courroie sans fin.** — Lorsqu'on veut transmettre le mouvement de rotation d'un arbre à un autre arbre parallèle au premier, et qui n'en est pas très-rapproché, on emploie souvent une courroie sans fin, qui embrasse deux tambours, dont chacun est fixé à un des arbres. Ce mode de transmission de mouvement est employé surtout dans les ateliers où plusieurs machines, disposées pour effectuer diverses espèces de travaux, reçoivent le mouvement d'une même machine motrice, d'une roue hydraulique par exemple, ou d'une machine à vapeur. La machine motrice fait tourner un ou plusieurs arbres qui s'étendent dans toute la longueur des ateliers; et c'est sur ces arbres que sont placées, de distance en distance, les courroies qui doivent faire mouvoir les diverses machines-outils destinées, soit à travailler les métaux, soit à préparer et filer le coton, soit à scier le bois, etc. La figure 68 montre une transmission de ce genre : la courroie, entraînée par le mouvement de rotation de l'arbre AB, fait tourner une meule à aiguiser. Si l'on veut arrêter le mouvement de la meule, il suffit de pousser vers la gauche l'extrémité C du levier CDE, mobile autour du point D; la fourchette qui termine le levier en E, et dans laquelle passe la courroie, est alors portée vers la droite, et la courroie, entraînée latéralement par cette fourchette, vient s'enrouler sur un second tambour placé à côté de celui sur lequel elle était appliquée. Ce second tambour, qu'on dési-

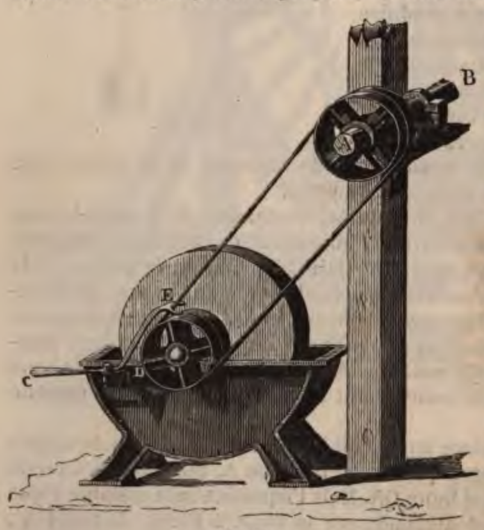


Fig. 68.

gne souvent sous le nom de *poulie folle*, n'est pas fixé à l'arbre qui le traverse, et peut, au contraire, tourner librement sur cet arbre : la courroie le fait donc tourner seul, sans que l'arbre participe à son mouvement, et la meule s'arrête. Lorsqu'on voudra remettre la meule en mouvement, on n'aura qu'à pousser vers la droite l'extrémité C du levier CDE, la courroie se replacera comme elle était d'abord, et obligera la meule à tourner.

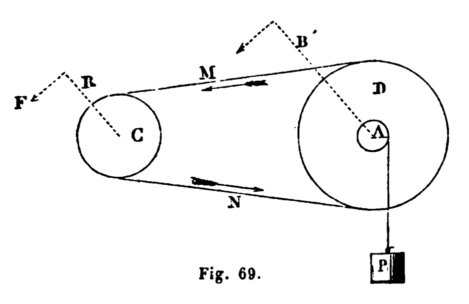


Fig. 69.

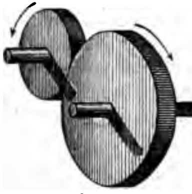
Afin de nous rendre compte de la manière dont les forces agissent, par l'intermédiaire des courroies sans fin, nous imaginerons qu'on veuille faire monter un poids P (fig. 69) attaché à une corde qui s'enroule sur un treuil A. Pour cela on agit sur la manivelle B, qui fait tourner le tambour C, et le mouvement de rotation se communique au treuil par la courroie MN. La courroie doit être tendue dans toute sa longueur, afin qu'il se produise, entre sa face intérieure et les surfaces des tambours, une adhérence qui l'empêche de glisser sur ces surfaces : mais la tension n'est pas la même partout. Pour que le poids P soit soulevé, il faut que le brin M, qu'on nomme le brin moteur, soit plus tendu que le brin N : l'excès de la première tension sur la seconde est une force qui agit tangentiellement au tambour D, et qui fait équilibre au poids P. D'une autre part, ce même excès de tension est une résistance, appliquée tangentiellement au tambour C, et qui doit être vaincue par la force F, appliquée à la manivelle. Si le bras de la manivelle est double du rayon du tambour C, la différence des tensions des brins M et N sera double de la force F; cette différence de tensions, agissant sur le tambour D, produira donc le même effet qu'une force égale à F agissant sur une manivelle B', dont le bras serait double du rayon du tambour D. Ainsi, que la force F agisse sur la manivelle B, pour faire tourner le treuil par l'intermédiaire de la courroie, ou bien qu'elle agisse sur la manivelle B', de manière à le faire tourner directement, elle sera capable de vaincre exactement le même poids P.

Remarquons maintenant que les longueurs des bras des manivelles B et B' sont dans le même rapport que les rayons des tam-

bours C et D, et nous verrons que l'emploi de la courroie sans fin, comme intermédiaire, produit le même effet, pour l'action de la force F, qu'une augmentation du bras de levier de cette force, dans le rapport des rayons des tambours C et D. En sorte que, si le rayon du tambour D est double, triple, quadruple, etc., du rayon du tambour C, la force F sera capable de soulever un poids P double, triple, quadruple, etc., de celui qu'elle soulèverait, si elle agissait sur la même manivelle B, appliquée directement au treuil. Il n'est pas nécessaire d'ajouter que, si le rayon du tambour D était plus petit que celui de l'autre tambour, la force F ferait équilibre à un poids plus faible que si elle agissait directement sur le treuil, à l'aide de la même manivelle.

§ 58. **Roues dentées, ou Engrenages.** — Les roues dentées sont destinées, comme les courroies sans fin, à transmettre le mouvement de rotation d'un arbre à un autre; on les emploie dans le cas où les deux arbres, étant parallèles, sont suffisamment rapprochés l'un de l'autre, et aussi lorsque les arbres ne sont pas parallèles.

Pour communiquer le mouvement d'un arbre tournant à un autre arbre qui lui est parallèle, et qui en est très-voisin, on pourrait se contenter d'adapter à ces deux arbres deux tambours dont les surfaces se touchent (fig. 70). Si ces deux tambours étaient suffisamment serrés l'un contre l'autre, il se produirait entre leurs surfaces une adhérence en vertu de laquelle l'un des deux tambours ne pourrait pas tourner sans entraîner l'autre. Les deux mouvements seraient de sens contraire, comme le montrent les flèches placées sur la figure 70. Mais dès que l'arbre auquel le mouvement doit être transmis aurait à vaincre une résistance un peu grande, l'adhérence ne serait plus suffisante pour le faire tourner, et un seul des deux tambours tournerait, en glissant sur l'autre.


Fig. 70.

Imaginons maintenant que, pour suppléer à l'adhérence, et faire en sorte que l'un des deux tambours ne puisse pas tourner sans entraîner l'autre, on ait disposé sur leurs contours des saillies et des cavités qui *engrènent* les unes dans les autres, et l'on aura ce que l'on nomme des *roues dentées*, ou bien un *engrenage*. Le mouvement se transmettra exactement de la même manière que précédemment ; mais l'une des deux roues ne pourra pas tourner, sans faire marcher l'autre, à moins toutefois que les saillies ou *dents* ne viennent à se briser.

Les dents d'une roue dentée sont toutes pareilles, et di[...]es régulièrement sur tout le contour de cette roue. Lorsq[...] roues doivent engrener l'une avec l'autre, une dent et le [...] qui la sépare de la dent voisine occupent le même espace sur les circonférences de ces deux roues : en sorte que les nombres des dents sont entre eux dans le même rapport que les longueurs de ces circonférences, et aussi dans le même rapport que leurs rayons. Une roue très-petite par rapport à la roue avec laquelle elle doit engrener, prend souvent le nom de *pignon*.

Sous le rapport de l'action des forces, les roues dent[...]rtent de la même manière que les tambours sur lesq[...]ne courroie sans fin. Supposons que la force F figure [...]t appliquée à la manivelle B, pour faire tourner le treuil A, par l'intermédiaire des roues dentées C et D, et faire monter ainsi le poids P. Les dents de la roue C exerceront sur les dents de la roue D une pression t, qui fera équilibre au poids P ; mais les dents de la roue D réagiront sur les premières, et leur feront supporter une pression égale et contraire t', qui devra être vaincue par la force F. Si le rayon de la roue C est le tiers du bras de la manivelle B, la pression t' sera le triple de F ; la force t sera donc aussi triple de F, et elle pourra être remplacée, pour vaincre le poids P, par une force égale à F, et agissant sur une manivelle B′ dont le bras soit le triple du rayon de la roue D. Ainsi la force F, appliquée à la manivelle B, et faisant monter le poids P par l'intermédiaire des roues dentées, doit avoir la même valeur que si elle était appliquée à la manivelle B′, fixée directement au treuil A. Remarquons en outre que le rapport des longueurs des manivelles B et B′ est le même que le rapport des rayons des roues C et D, et par conséquent aussi le même que le rapport des nombres de dents que portent ces roues ; nous en conclurons que, si la roue D a deux, trois, quatre fois plus de dents que la roue C, la force F pourra soulever un poids double, triple, quadruple de celui qu'elle soulèverait, si elle agissait sur la même manivelle B,

fixée directement au treuil. La figure 72 montre la disposition que l'on donne habituellement au *treuil à engrenages* dont on vient d'indiquer la théorie. On se sert de ce treuil dans un grand



Fig. 72.

nombre de circonstances, et nous aurons bientôt l'occasion d'en donner quelques exemples. Au lieu d'une seule manivelle, on en met deux, aux extrémités d'un même arbre, afin qu'on puisse au besoin employer deux hommes pour faire tourner le treuil.

La transmission du mouvement de rotation d'un arbre à un autre arbre qui fait un angle avec le premier s'effectue d'une manière tout à fait analogue, à l'aide de roues dentées appelées *roues d'angle*. La figure 73 représente deux roues de cette espèce servant à faire communiquer l'un avec l'autre deux arbres qui font entre eux un angle droit. Sous le rapport de la transmission des forces, on peut observer que tout ce qui a été dit pour les roues dentées, représentées par la figure 71, est applicable aux roues d'angle, sans qu'on ait à y changer un seul mot.

La figure 74 représente un engrenage d'une autre espèce, qui sert également à communiquer le mouvement de rotation d'un

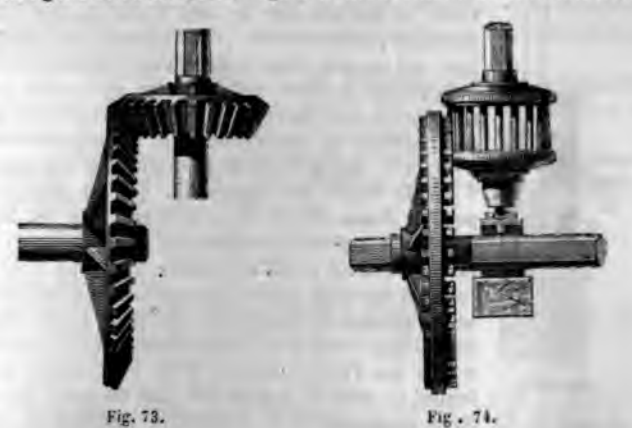


Fig. 73. Fig. 74.

arbre à un autre arbre qui lui est perpendiculaire. La forme particulière de la plus petite des deux roues lui a fait donner le nom de *lanterne*.

Souvent une roue dentée engrène avec une barre garnie de dents (fig. 75), en sorte que, lorsque la roue tourne, la barre marche dans le sens de sa longueur. Une pareille barre dentée se nomme une *crémaillère*. La résistance qui est appliquée à la crémaillère, et qui tend à s'opposer à son mouvement, se transmet intégralement aux dents de la roue; cette résistance, et la force qui agit sur une manivelle pour faire tourner la roue, doivent donc être entre elles dans le rapport inverse du rayon de la roue et du bras de la manivelle.

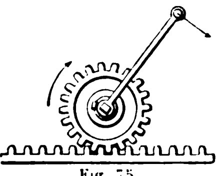
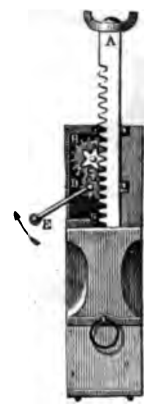


Fig. 75.

§ 59. **Cric.** — Comme exemple de l'emploi des roues dentées, pour exercer des efforts considérables, nous prendrons le *cric* (fig. 76), qui sert à soulever d'une petite quantité des corps très-pesants.

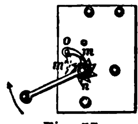
Une crémaillère A engrène avec un pignon C; sur l'axe de ce pignon est fixée une roue dentée B, qui tourne en même temps que lui, et qui engrène avec un second pignon D; enfin l'axe de ce second pignon est muni d'une manivelle E. On introduit l'ex-

trémité de la crémaillère au-dessous du corps qu'on veut soulever, puis on fait tourner la manivelle dans le sens indiqué par la flèche; le pignon D suit la manivelle, et fait tourner la roue B; le pignon C est entraîné par cette roue, et fait monter la crémaillère, qui produit ainsi l'effet qu'on voulait obtenir.


Fig. 76.

Évaluons la force qui doit être appliquée à la manivelle, pour faire équilibre à la résistance que doit vaincre la crémaillère. Nous supposerons, pour cela, que le bras de la manivelle soit égal à 5 fois le rayon du pignon C; que le pignon D porte 6 dents, et que la roue B en porte 18. Si la manivelle agissait directement sur le pignon C, la force qui lui serait appliquée, ayant un bras de levier 5 fois plus grand que celui de la résistance, ne serait que la cinquième partie de cette résistance. Mais l'action de la manivelle sur le pignon C a lieu par l'intermédiaire d'un engrenage, dans lequel la roue B a trois fois plus de dents que le pignon D : la force appliquée à la manivelle devra donc être trois fois plus petite qu'elle n'aurait été sans cela, c'est-à-dire qu'elle ne sera, en définitive, que la quinzième partie de la résistance que doit vaincre la crémaillère. Avec un pareil cric, une force de 40 kilogrammes suffirait pour soulever un poids de 600 kilogrammes.

Le corps du cric est un morceau de bois dans lequel on a pratiqué une entaille destinée à loger les roues dentées. Ces roues sont recouvertes par une plaque de tôle, traversée par l'axe de la manivelle, et qu'on a supposée enlevée dans la figure 76, afin de laisser voir le mécanisme. Un encliquetage, disposé sur la face extérieure de cette plaque (fig. 77), permet d'arrêter l'action de la force qui faisait tourner la manivelle, sans que pour cela la crémaillère cède sous l'effort du poids qu'elle supporte, et rentre à l'intérieur du cric, en faisant tourner les roues en sens contraire. Un doigt m, mobile autour du point o, vient s'engager entre les dents d'une roue n, qui fait corps avec la manivelle. D'après la forme des dents et la disposition du doigt, on voit que la manivelle ne peut tourner que dans un sens, celui indiqué par la flèche. Pendant qu'elle tourne, le doigt est successivement soulevé par les diverses dents de la roue, puis il retombe successivement, en vertu de son poids, chaque fois qu'une dent a passé. Lorsqu'on veut faire rentrer la crémaillère


Fig. 77.

dans le cric, on n'a qu'à soulever le doigt, en le faisant tourner autour du point *o*, pour l'amener dans la position *m'*; alors il ne touche plus les dents que par sa partie convexe, et la manivelle se retrouve dans les mêmes conditions que si l'encliquetage n'existait pas.

§ 60. **Chèvre.** — Pour élever les matériaux qui servent aux constructions, on emploie la *chèvre*, qui est une combinaison du treuil, de la poulie, et quelquefois des roues dentées.

La chèvre la plus simple (fig. 78) se compose de deux montants de bois, réunis par un certain nombre de traverses, et servant de support à un treuil T et à une poulie P. La chèvre est simplement posée sur le sol, ou sur un plancher placé à une certaine hauteur, sur lequel elle s'appuie par les deux extrémités inférieures de ces montants. Pour la maintenir dans la position inclinée qu'on est obligé de lui donner pour la faire fonctionner, on soutient son extrémité C à l'aide d'une corde CD, qu'on attache, soit à un arbre, soit à une maison. Le corps qu'on veut élever est saisi par une autre corde qui passe sur la gorge de la poulie, et vient aboutir au treuil, sur la surface duquel elle est fixée. On fait tourner le treuil à l'aide de leviers qu'on introduit dans des trous disposés pour cela, la corde s'enroule et le corps monte. La tension de la corde qui se détache du treuil est égale au poids du corps que cette corde soutient; la force à employer, pour élever le corps, est donc exactement la même que si la poulie n'existait pas, et que le corps fût directement suspendu au treuil.

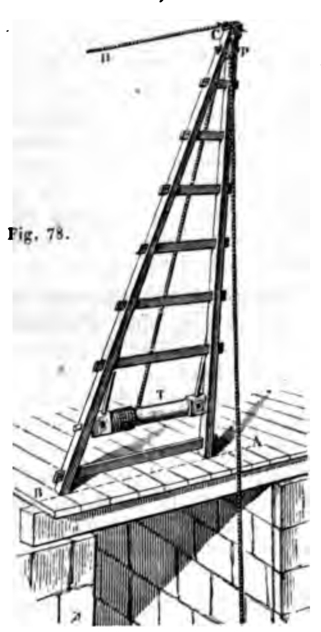


Fig. 78.

La tension de la corde CD, qui maintient la chèvre dans une position inclinée, peut être déterminée par les considérations suivantes. Si cette corde venait à être supprimée, la chèvre tomberait, en tournant autour de la ligne AB. Le poids du corps qu'on élève, et qui tend à produire ce mouvement de la chèvre,

est mis en équilibre par la tension de la corde CD ; ces deux forc peuvent donc être regardées comme agissant sur un levier, do les deux bras seraient les distances de la ligne AB à leurs dire tions; c'est-à-dire qu'elles doivent être entre elles dans le rappo

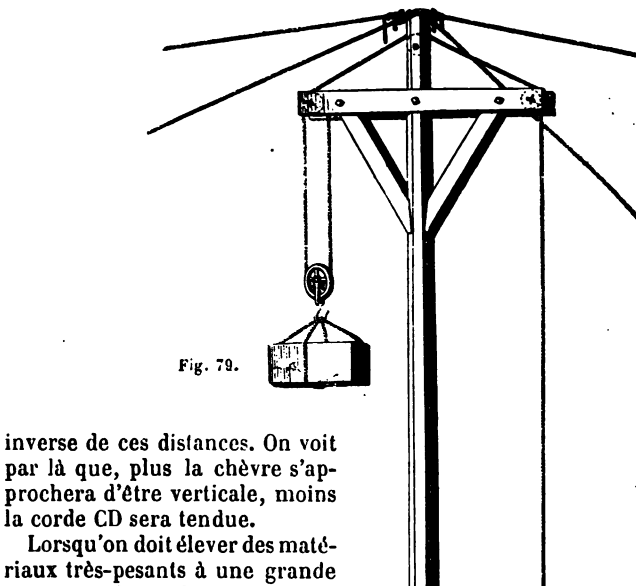


Fig. 79.

inverse de ces distances. On voit par là que, plus la chèvre s'approchera d'être verticale, moins la corde CD sera tendue.

Lorsqu'on doit élever des matériaux très-pesants à une grande hauteur, on emploie avec avantage la chèvre représentée par la figure 79. Cette chèvre est souvent désignée sous le nom de *sapine*. Elle se compose d'un treuil à engrenages pareil à celui qui est représenté par la figure 72 (page 58), et d'un mât vertical, terminé en croix à sa partie supérieure. Ce mât s'appuie, par un pivot de fer, dans une crapaudine adaptée au châssis de charpente auquel le treuil est fixé; il est maintenu verticalement par quatre cordes, ou haubans, qu'on attache à des points fixes situés dans le voisinage. Une corde s'a

tache à l'un des bras de la croix, descend pour passer dans la gorge d'une poulie mobile, à la chape de laquelle est suspendu le corps que l'on veut élever, remonte ensuite pour passer sur trois poulies fixes, et redescend enfin pour s'enrouler sur le treuil. On fait tourner le treuil en agissant sur les deux manivelles dont il est muni ; la corde s'enroule et le corps monte. Un encliquetage est adapté à l'axe des manivelles, pour empêcher que le corps ne redescende lorsqu'on l'abandonne.

Supposons, pour fixer les idées, que le poids qu'on élève soit de 1 200^k; que la roue dentée adaptée au treuil ait 10 fois plus de dents que le pignon avec lequel elle engrène, et que le bras de la manivelle soit 3 fois plus grand que le rayon du treuil. La corde qui soutient le poids de 1 200^k, par l'intermédiaire d'une poulie mobile à cordons parallèles, doit avoir une tension de 600^k ; les poulies fixes ne modifiant pas cette tension, on voit que la résistance que le treuil doit vaincre est de 600^k. Si la manivelle agissait directement sur le treuil, la force qu'on devrait lui appliquer serait 3 fois plus petite, c'est-à-dire de 200^k. Mais la manivelle agit par l'intermédiaire de deux roues dentées, dont l'une a 10 fois plus de dents que l'autre; la force qu'on doit lui appliquer est donc 10 fois plus petite qu'elle ne serait sans cela, c'est-à-dire qu'elle n'est que de 20^k. Observons enfin que l'axe du pignon porte deux manivelles, une à chaque bout ; si deux hommes agissent ensemble sur ces deux manivelles, chacun d'eux n'aura à exercer qu'une pression de 10^k.

On voit aisément que, d'après la disposition de cette chèvre, les tensions des haubans qui maintiennent la partie supérieure du mât ne sont jamais très-grandes.

§ 61. **Grue.** — La *grue* est destinée, comme la chèvre, à élever des corps très-pesants; elle se compose de même d'un treuil et d'une ou plusieurs poulies. Une corde s'enroule sur le treuil, s'en détache, passe sur les poulies, puis descend verticalement pour saisir le fardeau à élever ; ou bien encore elle passe sous la gorge d'une poulie mobile qui supporte ce fardeau, et vient ensuite, en remontant, s'attacher à un point fixe. Mais en outre, toute la machine peut tourner autour d'un axe vertical; en sorte que, lorsque le fardeau a été élevé à une hauteur convenable, on peut le faire mouvoir horizontalement, en faisant tourner la grue.

La figure 80 représente une grue construite par M. Cavé pour le port de Brest. La figure 81 montre le mécanisme de cette grue vue par derrière, et à une échelle plus grande. A est le treuil sur lequel s'enroule la corde. B est une roue dentée fixée à l'axe

du treuil, et qui tourne en même temps que lui ; elle porte 66 dents. Un pignon C engrène avec cette roue ; il porte 11 dents. A l'axe de ce pignon est fixée une roue dentée D, de 54 dents, qui est presque complétement cachée dans la figure 80. Un pignon E, de 9 dents, engrène avec la roue D. Enfin une roue dentée F, également de 54 dents, est fixée à l'axe de ce pignon. Les axes des roues D et F sont placés au même niveau, en sorte que le second cache le premier, sur la figure 81. Au-dessous de

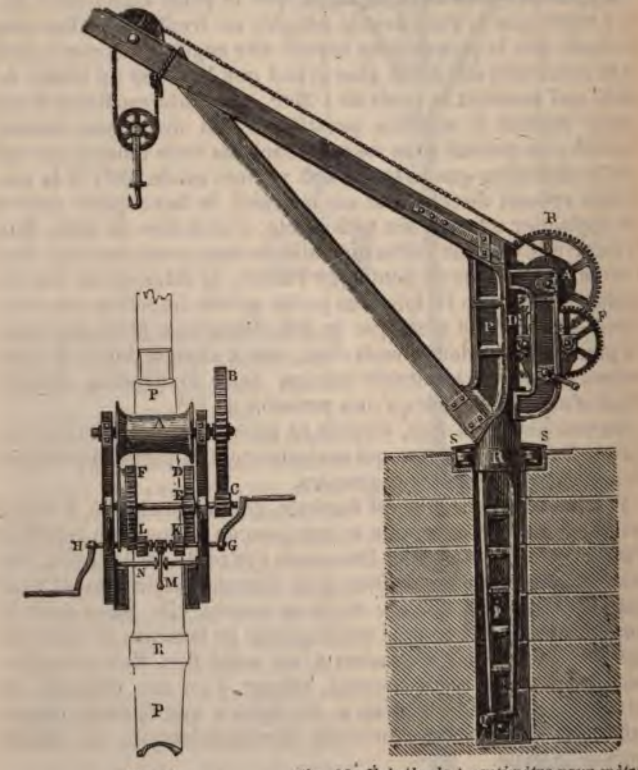


Fig. 81. Fig. 80. *Échelle de 1 centimètre pour mètre.*

ces deux roues, on aperçoit un axe GH, qui passe en avant de la partie inférieure de la roue D, et en arrière de la partie inférieure de la roue F : cet axe, muni d'une manivelle à chacune

de ses extrémités, porte deux pignons K, L, de chac qui, dans la position actuelle, n'engrènent avec a deux roues D et F. Si on le fait glisser dans le sens de s ur, vers la droite, le pignon K engrènera avec la roue D con-traire on fait glisser cet axe vers la gauche, le pignon L nera avec la roue F. L'axe GH est maintenu dans chacune trois positions différentes par un levier à contre-poids M. peut tourner autour du petit axe N, et dont l'une des extr , re-courbée en forme de crochet, vient s'engager entre illies disposées à cet effet sur l'axe GH. Dans la position a des pignons K, L, si l'on fait tourner les deux manivelles, uve-ment ne se transmettra à aucune roue, et le treuil ne tournera pas. Lorsque le pignon K engrènera avec la roue D, les manivelles feront tourner le treuil, par l'intermédiaire des roues B, D, et des pignons C, K; le pignon E et la roue F tourneront, mais sans servir à rien : les choses se passeront comme si ce pignon et cette roue n'existaient pas. Enfin, lorsque le pignon L engrènera avec la roue F, les manivelles feront tourner le treuil, par l'intermédiaire des roues B, D, F, et des pignons C, E, L.

Voyons comment on pourra trouver la grandeur de la force qui devra être appliquée à chaque manivelle, pour soulever un fardeau d'un poids connu. Nous admettrons pour cela que le bras de chaque manivelle, mesuré perpendiculairement à l'axe GH, soit égal à trois fois le rayon du treuil; et nous examinerons d'abord la disposition que présente le mécanisme, lorsque le pignon K engrène avec la roue D. Le fardeau étant soutenu par une poulie mobile à cordons parallèles, la tension de la corde est la moitié du poids du fardeau. Si une seule des deux manivelles agissait directement sur le treuil, elle devrait être soumise à une force trois fois plus petite que la tension de la corde : cette force serait donc la sixième partie du poids à soulever. Si cette manivelle agissait sur l'axe du pignon C, la force qu'on devrait lui appliquer serait six fois plus petite, c'est-à-dire la trente-sixième partie du poids à soulever, puisque le pignon C a six fois moins de dents que la roue B. Enfin cette manivelle agissant sur GH, et faisant tourner directement la roue D, à l'aide du pignon K, la force qui doit lui être appliquée sera, par une raison analogue, six fois plus petite que la précédente, c'est-à-dire la deux-cent-seizième partie du poids du fardeau. Mais l'axe GH est muni de deux manivelles : chacune d'elles devra donc recevoir l'action d'une force 432 fois plus petite que ce poids.

On reconnaîtra sans peine que, dans la seconde disposition, lorsque le pignon L engrènera avec la roue F, la force qu'on

devra appliquer à chaque manivelle ne sera que la sixième partie de celle qu'on devait employer dans la première disposition; c'est-à-dire qu'elle devra être 2592 fois plus petite que le poids du fardeau. On voit qu'avec une pareille grue deux hommes pourront soulever un poids énorme. Ils n'auront, par exemple, à exercer sur les manivelles que des pressions d'environ 10^k pour enlever une locomotive dont le poids est à peu près de 25000^k.

La pièce de fonte PP sert d'axe à toute la machine. Elle se termine inférieurement par un pivot Q, qui pénètre dans une crapaudine ; et à l'endroit où elle sort du massif de maçonnerie qui doit la maintenir verticalement, elle présente un renflement cylindrique R, à l'aide duquel elle s'appuie contre cette maçonnerie. Des galets S, S, sur lesquels nous reviendrons plus tard, sont disposés tout autour de cette partie R, afin de diminuer autant que possible les frottements qui se développent, lorsqu'on fait tourner la grue autour de son axe.

Lorsqu'un fardeau très-pesant est suspendu à la poulie mobile qui termine la grue, tout l'appareil tend à être renversé, et le serait nécessairement, si le massif de maçonnerie n'opposait pas une résistance suffisamment grande. Afin de nous faire une idée de la grandeur de cette résistance, nous allons voir comment on peut trouver la pression que la pièce PP exerce sur ce massif, par sa partie R; ou, ce qui revient au même, nous déterminerons la pression égale et contraire, que le massif exerce sur cette partie de la grue. Si la maçonnerie n'était pas suffisamment solide, la grue céderait à l'action du poids X du fardeau (fig. 82), et tomberait en tournant autour de son extrémité inférieure Q; la pression Y qu'elle supporte en R l'empêche de prendre ce mouvement : les deux forces X et Y se trouvent donc dans les mêmes conditions que si elles agissaient sur le levier coudé aQb. Ainsi le rapport de la pression Y, au poids X du fardeau, est le même que le rapport de Qa à Qb. Si Qa est égal à une fois et demie Qb, la pression Y sera égale à une fois et demie le poids du fardeau.

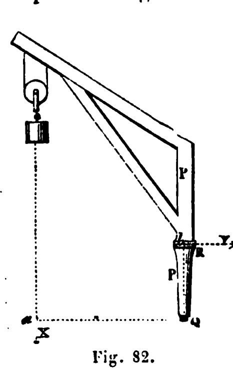


Fig. 82.

Les grues sont employées surtout pour décharger les bateaux. La machine est d'abord amenée dans une position telle que la poulie mobile qui la termine soit placée directement au-dessus du bateau ; après avoir fait descendre cette poulie, ce qui oblige

a corde enroulée sur le treuil à se dérouler, on attache le far-

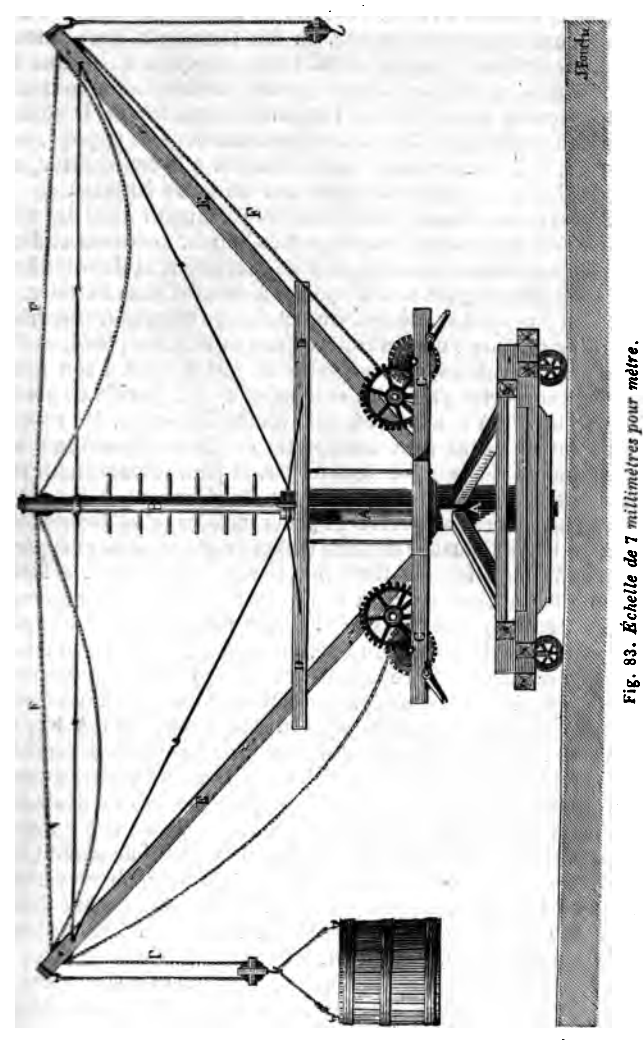


Fig. 83. *Échelle de 7 millimètres pour mètre.*

leau qu'on veut enlever au crochet par lequel sa chape se ter-

mine; puis on fait tourner le treuil, la corde s'enroule de nouveau, et le fardeau s'élève. Lorsque ce fardeau se trouve ainsi amené à une hauteur suffisante, on fait tourner la grue autour de son axe vertical, jusqu'à ce qu'il soit suspendu au-dessus de l'endroit où l'on veut le déposer; enfin on laisse aller le treuil au mouvement que tend à lui imprimer la tension de la corde, le fardeau descend, et dès qu'il est convenablement appuyé, soit sur le sol, soit sur la voiture qui doit servir à le transporter, on le décroche, pour opérer de même sur un autre fardeau.

Les grues sont encore employées fréquemment dans les ateliers où l'on a à remuer des corps très-lourds, notamment dans les établissements de construction de machines, et dans les fonderies. Plusieurs grues sont disposées à cet effet dans l'atelier, et on les fait fonctionner successivement, lorsqu'on veut transporter une pièce pesante : une première grue saisit cette pièce, et l'amène dans le voisinage d'une seconde, qui la saisit à son tour, pour la transporter plus loin, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la pièce se trouve à l'endroit où l'on voulait l'amener. On se sert également de grues pour transporter du foyer à l'enclume les grosses pièces de fer qu'on veut forger, et pour les maintenir sur l'enclume, pendant que les marteaux fonctionnent.

Enfin on se sert quelquefois de grues mobiles, c'est-à-dire dont l'axe, au lieu de tourner dans un massif de maçonnerie, est porté par un bâti de bois ou de fonte monté sur des roulettes. A l'aide de cette disposition, on peut transporter la grue tout entière à l'endroit où l'on doit s'en servir. Les roulettes doivent être placées sous le bâti de manière que, lorsque la grue fonctionne, la verticale menée par le centre de gravité de la machine tout entière, y compris le fardeau, passe à l'intérieur du polygone formé par les points de contact de ces roulettes avec le sol (§ 42). La figure 83 représente une grue de ce genre, employée à l'embarcadère de Denain. La partie inférieure forme une espèce de chariot, portant en son milieu une grosse pièce de bois verticale AA, qui sert d'axe à la grue. Cette pièce de bois, qui s'élève à moitié de la hauteur totale de la grue, est creusée circulairement; elle reçoit dans sa cavité la partie inférieure d'un madrier vertical et cylindrique B, qui peut y tourner librement, et qui forme ainsi comme le pivot de toute la partie mobile. Les madriers horizontaux CC, DD, s'appuient, les uns sur la tête de la pièce de bois AA, les autres sur un collier que présente cette pièce; ils sont suspendus par des tringles de fer au madrier vertical B, et servent de points d'appui aux pièces inclinées EE; ces dernières pièces sont d'ailleurs reliées au madrier B par d'autres tringles

de fer, qui soutiennent leurs extrémités supérieures. La grue est

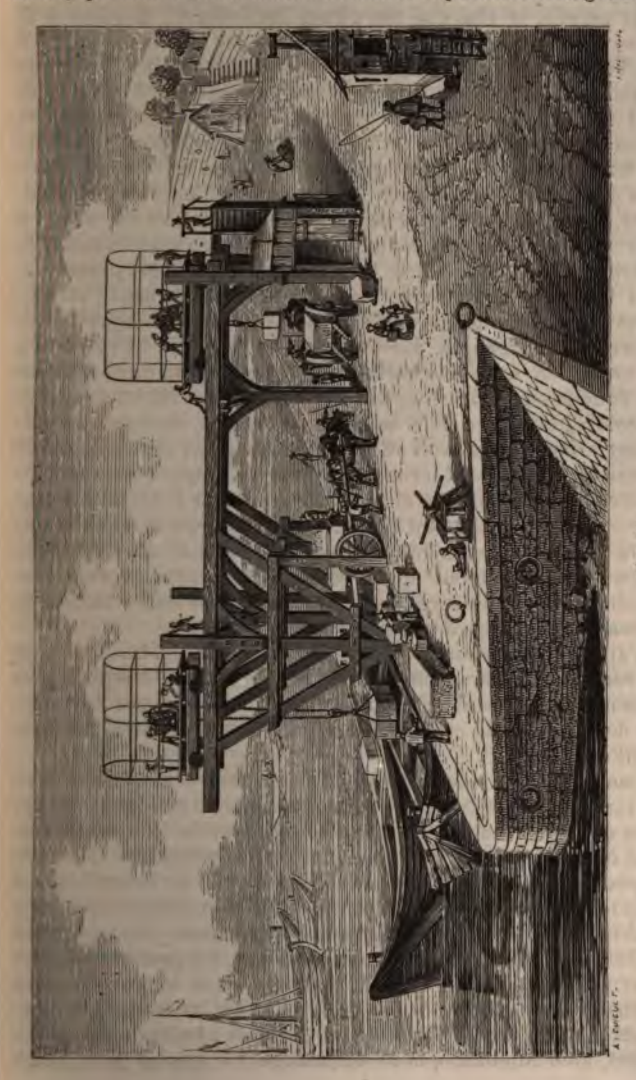


Fig. 84.

double : elle est munie de deux treuils à engrenages entièrement pareils, et chacune des pièces inclinées E, E porte à sa partie supérieure deux poulies montées sur un même axe. Le treuil de droite fonctionne seul, dans la figure ci-jointe : la corde F, qui s'en détache, monte sur l'une des poulies de droite, se rend de là horizontalement sur une des poulies de gauche, et descend pour soutenir le fardeau, à l'aide d'une poulie mobile.

§ 62. Depuis quelque temps on a substitué aux grues destinées à décharger les bateaux, des appareils d'une nature différente, auxquels on a cependant conservé le nom de *grue*. La figure 84 représente un des appareils de ce genre qui sont installés à Paris, au bord de la Seine. Il se compose d'une charpente fixe, dont la partie supérieure, disposée horizontalement, et s'avançant jusqu'au-dessus de l'eau, porte un petit chemin de fer. Un treuil à engrenages, pareil à celui de la figure 72 (page 58), est monté sur un petit chariot mobile le long de ce chemin de fer. Pour se servir de cet appareil, on pousse le chariot qui porte le treuil, jusqu'à ce qu'il se trouve au-dessus du bateau à décharger; puis, après avoir attaché le corps qu'on veut enlever du bateau au crochet qui termine la corde du treuil, on agit sur les manivelles de manière à enrouler la corde sur le treuil ; quand ce corps est suffisamment élevé, on fait mouvoir le chariot qui porte le treuil de manière à l'amener au-dessus d'une voiture qu'on a préalablement placée sous la charpente; et enfin, en laissant dérouler la corde du treuil, on dépose sur la voiture le fardeau que cette corde supportait.

L'appareil représenté par la figure 84 est double. La charpente est surmontée de deux chemins de fer, sur chacun desquels peut se mouvoir un chariot portant un treuil à engrenages. Chacune des deux parties de cet ensemble peut fonctionner indépendamment de l'autre.

Une disposition analogue à celle que nous venons de décrire est souvent employée dans les constructions un peu importantes, pour élever les matériaux et les amener près du lieu où ils doivent être employés. Après avoir établi un échafaudage solide, on dispose au haut de cet échafaudage un chemin de fer qui s'étend dans toute la longueur des travaux, et l'on installe sur ce chemin de fer un chariot portant un treuil à engrenages. On comprend facilement comment, à l'aide de ce treuil, on peut prendre les matériaux déposés sur le sol, les élever à une hauteur plus ou moins grande, suivant les besoins, et enfin les transporter horizontalement lorsqu'ils ont été ainsi élevés à la hauteur voulue. Il faut, bien entendu, que l'échafaudage soit disposé de manière

à laisser passer librement la corde qui descend au-dessous du treuil, pendant qu'on transporte celui-ci horizontalement le long du chemin de fer.

§ 63. **Plan incliné.** — Lorsqu'un corps est appuyé sur une surface plane, et qu'on cherche à le faire glisser sur cette surface, on éprouve une résistance due au frottement. Cette résistance, très-grande dans certains cas, est au contraire très-faible dans d'autres cas, suivant la nature et le degré de poli que présentent les surfaces qui glissent l'une sur l'autre. C'est ainsi qu'on a une très-grande peine à faire glisser une grosse pierre sur le sol, tandis que si elle était posée sur un traîneau muni de patins, et qu'on voulût faire glisser ce traîneau sur la glace, on y parviendrait beaucoup plus facilement. On peut concevoir que la surface du corps qu'on veut faire glisser, et la surface plane sur laquelle elle s'appuie, soient tellement polies, que l'on n'éprouve aucune résistance à produire le glissement. Cet état des corps qui glissent est purement idéal, et ne se réalise jamais : cependant nous supposerons qu'il soit réalisé, et nous regarderons, dans ce qui va suivre, le mouvement d'un corps sur une surface plane, comme pouvant s'effectuer sans la moindre résistance provenant du frottement. Nous avons déjà admis implicitement quelque chose d'analogue, lorsque nous avons parlé des poulies, des moufles, du treuil, des engrenages, etc. : car nous n'avons pas tenu compte des résistances qui sont toujours occasionnées, dans ces diverses machines, par les frottements des pièces les unes contre les autres, et notamment des tourillons contre les surfaces intérieures des coussinets dans lesquels ils tournent. Nous reviendrons plus loin sur ces résistances, dont nous faisons abstraction, afin de voir en quoi elles modifient les résultats auxquels nous arrivons en les négligeant.

Pour maintenir en équilibre un corps pesant (fig. 85), qui est placé sur un plan incliné AB, on peut lui appliquer une force Q dirigée parallèlement au plan. Cherchons à déterminer la grandeur de cette force. Le corps est soumis à l'action de son poids, que nous pourrons représenter par la ligne GD. Ce poids peut être décomposé en deux forces, dont l'une GE est parallèle au plan, et l'autre GF lui est perpendiculaire. La composante GF appuie le corps sur le plan ; mais elle ne tend à le faire glisser, ni dans une direction, ni dans une autre, et est détruite

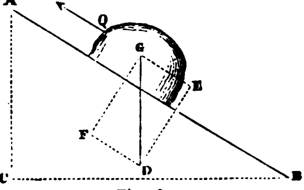


Fig. 85.

par la fixité du plan. L'autre composante GE, au contraire, tend à faire descendre le corps suivant la ligne de plus grande pente du plan, et pour que la force Q le maintienne en équilibre, il faut qu'elle soit égale et directement opposée à cette composante : on voit en effet que, si la force Q ne détruisait qu'une portion de la force GE, la portion restante, quelque petite qu'elle soit, ferait descendre le corps, puisque nous admettons qu'il n'y a aucune résistance qui provienne du frottement.

Observons maintenant que, si nous menons la verticale AC, et l'horizontale BC, nous formerons un triangle rectangle ABC, qui sera semblable au triangle rectangle DEG; car, outre que ces deux triangles ont chacun un angle droit, les angles en A et en G sont égaux, comme ayant leurs côtés parallèles et dirigés dans le même sens. Le rapport de EG à DG est donc égal au rapport de AC à AB; en sorte que, si l'on nomme AC la hauteur du plan incliné, et AB sa longueur, on peut dire que le rapport de la force Q au poids du corps est égal au rapport de la hauteur du plan incliné à sa longueur. Si la hauteur AC est le quart, le cinquième, le sixième de la longueur AB, la force Q sera le quart, le cinquième, le sixième du poids du corps.

§ 64. On emploie quelquefois le moyen représenté par la figure 86 pour faire descendre des tonneaux le long d'une rampe,



Fig. 86.

ou d'un escalier. Deux cordes sont attachées par une de leurs extrémités à un morceau de bois, placé transversalement au

haut, et maintenu solidement dans cette position ; ces cordes descendent le long du plan incliné, passent sous le tonneau, se relèvent ensuite en embrassant la moitié de son contour, et enfin, se détachant parallèlement à leur direction primitive, elles viennent aboutir dans les mains de deux hommes, qui les tirent suffisamment pour maintenir le tonneau en équilibre. Les deux hommes, en laissant filer lentement les cordes dans leurs mains, font descendre le tonneau aussi doucement qu'ils veulent.

Si les cordes embrassent le tonneau à égale distance de ses deux extrémités, les deux hommes auront la même force de résistance à déployer; d'un autre côté, les parties de la corde qui reposent sur le plan incliné sont tendues de la même manière que les autres. Le tonneau est donc soumis à l'action de quatre forces égales, parallèles entre elles, et parallèles au plan incliné ; ces quatre forces ont une résultante quadruple de chacune d'elles, et qui doit maintenir le tonneau en équilibre sur ce plan incliné. En admettant que la hauteur du plan soit la moitié de sa longueur, cette résultante devra être la moitié du poids du tonneau : la force déployée par chacun des hommes, étant quatre fois plus petite, ne sera donc que la huitième partie de ce poids.

Ce qui vient d'être dit est parfaitement exact dans le cas d'une rampe : il n'en est pas tout à fait de même dans le cas d'un escalier. Les marches de l'escalier amènent de l'irrégularité dans la descente, ainsi que dans la grandeur des forces que les hommes doivent appliquer aux cordes pour retenir les tonneaux ; mais on peut regarder ces forces, qui varient d'un moment à l'autre, comme étant en moyenne les mêmes que si l'escalier était remplacé par une rampe de même pente.

§ 65. **Haquet.** — Le haquet est une espèce de charrette à long brancard, qui est beaucoup employée pour transporter des ballots pesants et surtout des tonneaux. Les limons ne font pas corps avec le brancard : ils y sont attachés seulement par une espèce de grand boulon de fer, qui traverse sa partie antérieure, et autour des extrémités duquel ils peuvent tourner librement. Ce mode de jonction permet de faire basculer le brancard, de manière à appuyer son extrémité postérieure sur le sol ; dans ce mouvement de bascule, les limons restent à peu près dans la position horizontale qu'ils avaient auparavant, et le cheval ne s'en trouve nullement gêné. Le brancard ainsi placé (fig. 87) forme un plan incliné : le chargement et le déchargement des fardeaux s'y feront donc beaucoup plus facilement que sur une charrette ordinaire. Les limons portent en outre, dans le voisinage de leur jonction avec le brancard, un tour à l'aide du-

quel un homme seul peut charger et décharger des fardeaux très-pesants.

Lorsque le haquet est convenablement chargé, on relève l'extrémité postérieure du brancard, qui reprend ainsi sa position

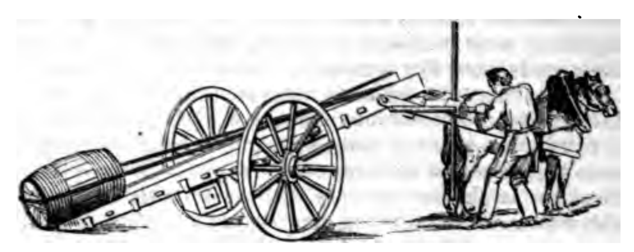


Fig. 87.

horizontale. La corde qui s'enroule sur le tour, et qui est destinée à faire monter les fardeaux sur le brancard incliné, sert ensuite, pendant toute la durée du transport, à les maintenir dans la position qu'on leur a donnée. A cet effet, on la fait passer sur les fardeaux, on l'attache à la partie postérieure du haquet, et à l'aide du tour on lui communique une tension suffisante ; puis, afin de maintenir cette tension, on attache aux limons un des leviers qui servent à agir sur le tour.

Il nous sera facile de déterminer la grandeur de la force que doit développer un homme, en agissant à l'extrémité de l'un des leviers du tour, pour faire monter, sur le brancard incliné, un corps qui serait attaché à la corde du tour. Admettons que, lorsque le brancard est incliné, la hauteur de sa partie antérieure au-dessus du sol soit le quart de sa longueur : la tension de la corde devra être le quart du poids du corps qu'elle fait monter, d'après ce que nous avons vu dans le § 63. Si le bras de levier de la force développée par l'homme est dix fois plus grand que le rayon du tour, cette force devra être dix fois plus petite que la tension qu'elle communique à la corde : elle sera donc aussi quarante fois plus petite que le poids du corps. Ainsi, avec une force de 30k, appliquée à l'extrémité de l'un des leviers du tour, on pourra faire monter sur le haquet un fardeau pesant 1 200k.

Cette machine, qui présente une heureuse combinaison du tour et du plan incliné, est de l'invention de Pascal.

§ 66. **Coin.** — Le coin sert, comme on sait, pour écarter deux corps l'un de l'autre, ou deux portions d'un même corps, lorsque cet écartement ne peut s'effectuer qu'en employant un grand

effort. On s'en sert notamment pour fendre le bois à brûler. Un coin n'est autre chose qu'un prisme triangulaire ABC (fig. 88), ordinairement de fer, dont une des faces AB est petite relativement aux deux autres faces AC, BC ; ces deux dernières faces sont d'ailleurs habituellement égales l'une à l'autre, en sorte que le prisme est isocèle. En appliquant une force perpendiculairement à la face AB, que l'on nomme la tête du coin, on détermine son enfoncement dans la fente où on l'a préalablement introduit ; et il en résulte un écartement des deux bords de cette fente, avec lesquels les faces AC, BC, sont en contact.

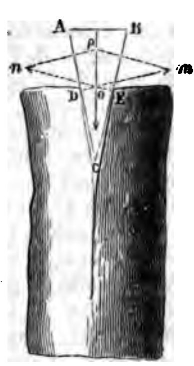


Fig. 88.

Afin de nous rendre compte du mode d'action du coin, cherchons à déterminer la grandeur de la force qu'il faudrait appliquer sur la tête AB, pour faire simplement équilibre aux pressions qu'il éprouve en D et en E, de la part des deux bords de la fente. Ces pressions sont perpendiculaires aux faces AC, BC, et nous pouvons les représenter par les lignes *om*, *on* ; en construisant le parallélogramme *monp*, nous trouvons *op* pour la ligne qui représente la résultante de ces deux pressions ; pour que la force appliquée sur la face AB fasse équilibre aux deux pressions *om*, *on*, et par conséquent à leur résultante *op*, il faudra qu'elle soit égale et directement opposée à cette résultante. Ainsi *op* doit être perpendiculaire à AB. Mais *om* et *pm* sont respectivement perpendiculaires à AC et BC : donc les deux triangles *omp*, ABC, sont semblables comme ayant leurs côtés perpendiculaires. Il en résulte d'abord que *om* est égal à *pm* ou à *on*, puisque AC est égal à BC ; c'est-à-dire que les deux faces latérales du coin supportent des pressions égales en D et en E. On en déduit en outre que le rapport de la force qui doit être appliquée sur la tête AB, à l'une de ces deux pressions latérales, est le même que celui de la ligne AB à l'une des lignes AC, BC. On voit donc que, plus l'angle ACB sera aigu, plus la force nécessaire pour produire l'écartement des deux points D, E sera faible.

§ 67. **Équilibre des cordes ou chaînes qui supportent des corps pesants.** — Lorsqu'une corde ou une chaîne est attachée, par une de ses extrémités, en un point fixe, et qu'elle supporte un corps pesant suspendu à son autre extrémité, elle se dispose verticalement, et sa tension est égale au poids du corps. Mais il arrive souvent que des corps pesants sont suspendus d'une

manière beaucoup moins simple : nous allons nous servir d'un exemple bien connu, pour montrer comment on peut, dans tous les cas, déterminer les tensions qui se développent dans les diverses parties de l'appareil de suspension. Nous prendrons pour cela le mode de suspension des lanternes à huile, qui servent à éclairer les rues, et qui ont disparu en grande partie depuis qu'on emploie l'éclairage au gaz.

Une chaîne ABCD (fig. 89) est attachée à ses deux extrémités A et D à deux poteaux. Au point C de cette chaîne, est accrochée une poulie F. Une corde, attachée en B, passe sous la gorge de la poulie mobile E, qui supporte la lanterne, puis sur les deux poulies F et G, et vient se fixer à un clou placé dans une boîte H, dans laquelle on peut serrer l'excédant de la corde.

La tension de la corde BEFGH doit être la même dans toute son étendue, d'après ce que nous avons vu à l'occasion de la poulie (§ 52). Cette tension s'obtiendra en observant que les ten-

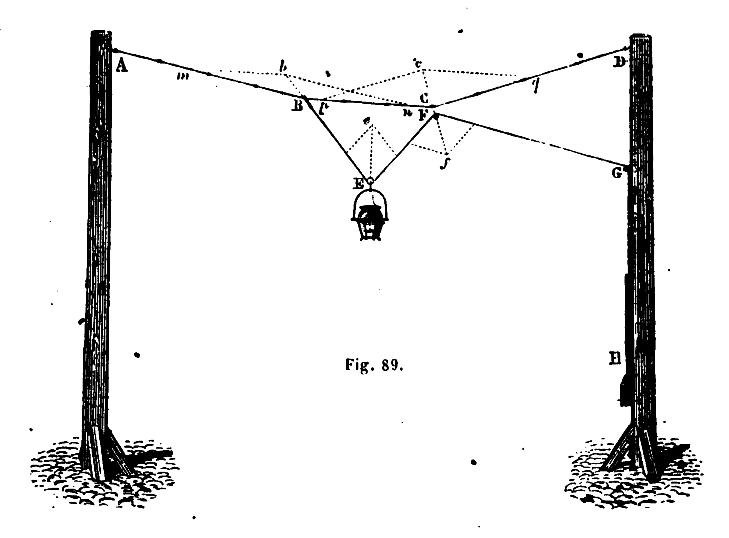


Fig. 89.

sions des deux cordons EB, EF, doivent avoir une résultante égale au poids de la lanterne : en sorte que, si l'on porte sur la verticale qui passe par le point E une longueur E*e* qui représente ce poids, et que par le point *e*, on mène des parallèles aux cordons EB, EF, on formera un parallélogramme dont les côtés représenteront les tensions de ces deux cordons. Ainsi que nous l'avons déjà vu,

ces tensions devant être égales, il est nécessaire que les cordons EB, EF soient également inclinés sur la verticale.

Pour déterminer les tensions des trois parties AB, BC et CD de la chaîne, nous remarquerons que cette chaîne est soumise : 1° en B, à une force dirigée suivant BE, et égale à la tension de la corde, tension dont nous venons de trouver la grandeur; 2° au point C, à une force qui est la résultante F*f* des tensions des cordons FE, FG. Les tensions des deux parties BA, BC, faisant équilibre à la force qui agit suivant BE, doivent avoir une résultante égale et contraire à cette force. Si donc nous portons, à partir du point B, sur le prolongement de BE, une longueur B*b* égale à la tension de la corde, et que par le point *b* nous menions des parallèles aux parties BA et BC de la chaîne, nous trouverons les lignes B*m*, B*n*, qui représenteront leurs tensions. De même, si nous portons à partir du point C, sur le prolongement de CF*f*, une longueur C*c* égale à F*f*, et que nous formions le parallélogramme C*pcq*, les lignes C*p*, C*q* représenteront les tensions des parties BC, CD. La configuration de la chaîne ABCD devra être telle que les lignes B*n*, C*p* déterminées comme on vient de le dire, soient égales entre elles, puisqu'elles représentent toutes deux la tension de BC. Pour évaluer en kilogrammes les tensions ainsi déterminées, il suffira de chercher combien de fois les lignes qui les représentent contiennent la ligne qui a été choisie pour représenter un kilogramme.

§ 68. **Chaînes des ponts suspendus.** — Nous pouvons encore, à l'aide des principes exposés précédemment, faire voir comment on détermine la figure qu'on doit donner aux chaînes qui supportent un pont suspendu.

Nous supposerons, pour simplifier, que le pont est suspendu à une seule chaîne. Il est clair que lorsqu'il y en aura deux, la figure de chacune d'elles sera la même que si elle était seule pour supporter le pont : il n'y aura de différence que dans la charge totale, et par suite dans les tensions des diverses parties de la chaîne; ces tensions seront moitié moindres, dans le cas où le pont sera supporté par deux chaînes.

Soit *abcdefgh* (fig. 90) la chaîne dont on veut déterminer la figure; et soient M, N, P, Q, R, S, les barres de fer qui servent à suspendre le tablier du pont. Voyons d'abord à quelle condition la chaîne et les barres de suspension doivent satisfaire, pour que le pont soit convenablement suspendu. Si le tablier était coupé transversalement aux points A, B, C, D, E, F, G, chacune des barres aurait à supporter la portion de ce tablier au milieu de laquelle elle est fixée. Pour que le pont soit bien construit, il

faut que les diverses portions du tablier, ainsi détachées les unes des autres, n'en restent pas moins sur un même plan horizontal. Car s'il en était autrement, si quelques-unes s'abaissaient, d'autres s'élèveraient, et le tablier présenterait dans son ensemble

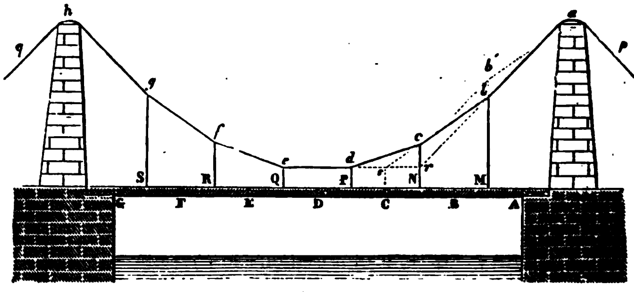


Fig. 90.

une figure sinueuse. Avant d'être coupé en diverses portions, il aurait donc tendu également à prendre cette figure sinueuse; sa flexibilité lui aurait permis de se déformer un peu; mais comme il n'aurait pas pu subir toute la déformation qui se produirait dans le cas où les parties AB, BC, CD,...., seraient complétement détachées les unes des autres, il en serait résulté des tensions très-inégales des barres M, N, P...... Ainsi la condition énoncée précédemment doit être remplie, pour que le tablier du pont reste horizontal dans toute son étendue et que les barres de suspension soient également chargées. C'est cette condition qui va nous permettre de trouver la figure de la chaîne, et les longueurs des diverses barres qui la réunissent au tablier.

Après avoir divisé le tablier en parties égales, par les points A, B, C, D,....., on tracera des lignes verticales par les milieux de ces divisions, pour indiquer les directions des barres de suspension. On placera ensuite, entre les deux barres du milieu, le côté *de* de la chaîne, côté qui doit être horizontal, mais dont la hauteur au-dessus du tablier sera prise à volonté.

Pour trouver la direction du côté *ab*, on observera que les trois portions AB, BC, CD du tablier, qu'on peut supposer attachées ensemble, sont en définitive supportées par les deux chaînons *ab* et *de* : si l'on venait à couper ces chaînons, la portion ABCD du pont tomberait, puisqu'on admet qu'elle est détachée du reste du pont en A et en D. Les tensions des chaînons *ab* et *de* font donc équilibre au poids de cette portion du pont, c'est-à-dire qu'elles doivent avoir une résultante égale à son poids, et dirigée suivant

la verticale N, qui passe par son centre de gravité. Il résulte de là que les deux chaînons *ab* et *de* prolongés doivent se rencontrer sur cette verticale. On prolongera donc la ligne *de* jusqu'à la rencontre de la verticale N en *r*; puis, en joignant ce point *r* au point *a*, on aura la direction du chaînon *ab*, et par suite l'extrémité supérieure *b* de la barre M.

Pour déterminer la direction du chaînon *bc*, on observera de même que la tension de ce chaînon, et celle de *de*, font équilibre au poids de la portion BCD du pont; ces deux chaînons prolongés doivent donc se rencontrer en un point situé sur la verticale passant par le milieu C de cette portion BCD. Ainsi on prendra le point de rencontre *s* de cette verticale avec le prolongement de la ligne *de*; on joindra ce point *s* au point *b*, déterminé précédemment, et l'on aura la direction du chaînon *bc*, et l'extrémité *c* de la barre N.

Enfin on joindra le point *c* au point *d*, et l'on aura ainsi la forme d'une moitié de la chaîne. L'autre moitié sera toute pareille, et ses diverses parties se détermineront de la même manière.

Quant aux parties extérieures *ap*, *hq*, on leur donnera la même inclinaison qu'aux chaînons *ab*, *gh*. La chaîne étant simplement posée sur la partie supérieure *a* du massif de maçonnerie, et pouvant glisser sur ce massif d'un côté ou d'un autre, on doit regarder les tensions des chaînons *ab*, *ap*, comme étant égales; la résultante de ces deux tensions sera donc dirigée verticalement, si *ab* et *ap* sont également inclinés; et cette résultante, qui n'est autre chose que la pression exercée par la chaîne sur le massif, ne tendra pas à le renverser, ni à droite ni à gauche.

Les tensions des diverses parties de la chaîne se détermineront très-facilement. Si nous considérons, par exemple, les deux chaînons *ab*, *bc*, nous voyons que leurs tensions doivent avoir une résultante égale au poids de la portion AB du pont, et dirigée verticalement, de bas en haut : on n'aura donc qu'à décomposer cette résultante, *bb'*, qui est connue, en deux composantes dirigées suivant *ba* et *bc*, et l'on aura les tensions de ces deux chaînons.

ÉTUDE DES MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT UNIFORME.

§ 69. Les diverses machines dont nous nous sommes occupés jusqu'ici ont été considérées uniquement sous le point de vue de l'équilibre des forces qui leur étaient appliquées. Nous avons vu ainsi comment les efforts se transmettent à l'aide des machines, en se modifiant souvent d'une manière très-considérable; en sorte que l'emploi d'un levier, d'un tour, d'un cric, etc., permet

de faire équilibre à une résistance très-grande, avec une force beaucoup plus petite. Sous ce point de vue, on peut dire que les machines multiplient les forces.

Mais on n'aurait qu'une idée très-imparfaite des machines, si l'on se contentait de les considérer ainsi à l'état d'équilibre : cela pourrait même avoir de graves inconvénients, en ce qu'on serait porté à leur attribuer une puissance tout autre que celle qu'elles ont réellement. Si l'on voit encore maintenant beaucoup de personnes qui cherchent le *mouvement perpétuel* (nous entrerons plus loin dans quelques détails sur cette question), cela tient uniquement à ce qu'elles ont quelques notions sur l'équilibre des forces qui agissent sur les machines, et que ces notions n'ont pas été complétées, comme elles devraient toujours l'être, par la considération des mouvements des diverses pièces sur lesquelles ces forces agissent.

Nous allons nous occuper de ce complément indispensable, c'est-à-dire de l'étude des machines à l'état de mouvement. Nous supposerons d'abord que les diverses parties dont une machine se compose soient animées de mouvements uniformes; plus tard nous examinerons l'influence que la non-uniformité de ces mouvements peut avoir sur les résultats auxquels nous allons parvenir.

Lorsqu'une machine est à l'état de mouvement uniforme, les forces qui lui sont appliquées doivent se faire équilibre, tout aussi bien que si la machine ne se mouvait pas : car si elles ne se neutralisaient pas mutuellement, elles modifieraient nécessairement les mouvements des diverses pièces dont la machine se compose. Les résultats que nous avons obtenus, relativement à la grandeur de la force capable de faire équilibre à une résistance donnée, à l'aide d'une machine, conviennent donc encore dans le cas où la machine se meut uniformément.

§ 70. **Ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse.** — En examinant les diverses machines que nous avons étudiées jusqu'à présent, il nous sera facile de constater l'existence du principe suivant : *Ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse.*

Prenons d'abord pour cela le levier, droit ou coudé, sur lequel agissent des forces dirigées perpendiculairement aux bras du levier. Les deux forces P, Q, qui se font équilibre sur le levier ACB (fig. 91), doivent être entre elles dans le rapport inverse des bras de levier AC, BC. Si le levier tourne uniformément autour du point d'appui C, il prendra, au bout d'un temps très-court, la position A'CB'; et, dans ce mouvement, les deux points A et B décriront deux arcs de cercle AA', BB', proportionnels à leurs

ns AC, BC, puisque ces arcs correspondent à des angles
', BCB' égaux
e eux. On voit
: que, si AC est
ole, triple, qua-
le de BC, on
ra bien avec
force P faire
libre à une
: Q deux fois,
fois, quatre



Fig. 91.

plus grande; mais que, d'un autre côté, le chemin parcouru
le point d'application de cette force Q sera deux fois, trois
quatre fois plus petit que celui que parcourra dans le même
ps le point d'application de la force P. La vitesse du premier
t sera d'autant plus faible par rapport à la vitesse du second,
la force Q qui agit sur ce premier point sera plus grande par
ort à la force P : on peut donc bien dire ici que ce qu'on
ie en force, on le perd en vitesse.

ins la poulie mobile à cordons parallèles (fig. 60, page 47), la
: de traction qui doit être appliquée à la corde n'est que la
ié du poids que cette force maintient en équilibre; mais
i, pour que le poids monte d'une certaine quantité, il faut
la main qui tire la corde monte d'une quantité double. Le
cipe énoncé se vérifie donc encore dans ce cas.

ins les moufles, représentées par la figure 62 (page 48), la
: de traction appliquée à la corde n'est, comme nous l'avons
que la sixième partie du poids à soulever. Mais, pour que ce
s monte d'un décimètre, il faut que la longueur de chacun
cordons qui réunissent la moufle supérieure à la moufle in-
ure diminue d'un décimètre ; et comme la longueur totale
corde reste la même, il est nécessaire pour cela que la main
ire l'extrémité libre ait marché de 6 décimètres : donc, si la
sance employée est six fois plus petite que la résistance à
cre, d'une autre part elle ne fait parcourir au point d'appli-
n de cette résistance que la sixième partie du chemin qu'elle
ourt elle-même.

ins le cric, représenté par la figure 76 (page 60), nous avons
vé que la force qui doit agir sur la manivelle n'est que la
zième partie de la résistance à vaincre. Voyons dans quel
ort se trouvent les chemins parcourus par les points d'ap-
ition de ces deux forces. Pendant que le pignon C fera un
entier, la roue B fera également un tour ; mais le pignon D,

qui engrène avec elle, ayant trois fois moins de dents, devra faire trois tours. Pour faire faire un tour au pignon C, et par conséquent faire avancer la crémaillère d'une quantité égale à la circonférence de ce pignon, il faudra donc que la manivelle fasse trois tours; et si l'on observe que, le bras de la manivelle étant cinq fois plus grand que le rayon du pignon C, la circonférence qu'elle décrit est cinq fois plus grande que celle de ce pignon, on reconnaîtra qu'en définitive la puissance appliquée à la manivelle parcourt un chemin quinze fois plus grand que celui que la crémaillère fait parcourir à la résistance.

Dans la chèvre (fig. 79, page 62) nous avons vu qu'une seule force, agissant sur une des manivelles, devrait être de 20 kilogrammes pour élever un poids de 1200 kilogrammes : la puissance est donc 60 fois plus petite que la résistance. Pendant que le treuil fait un tour entier, la manivelle fait dix tours, puisque le pignon fixé à l'axe de la manivelle porte dix fois moins de dents que la roue fixée au treuil; le bras de la manivelle étant trois fois plus grand que le rayon du treuil, la circonférence qu'elle décrit est trois fois plus grande que la circonférence du treuil : ainsi, pendant que la corde s'enroule sur le treuil d'une quantité égale à cette dernière circonférence, la manivelle parcourt un chemin trente fois plus grand. Mais la quantité dont s'élève le poids suspendu à la poulie mobile n'est que la moitié de la quantité dont la corde s'enroule sur le treuil : donc, si d'une part la puissance est 60 fois plus petite que la résistance, on voit que d'une autre part elle parcourt un chemin 60 fois plus grand que celui qu'elle fait parcourir à cette résistance.

§ 71. Dans les divers exemples qu'on vient de prendre, les points d'application des forces se déplacent suivant la direction même de ces forces, soit dans le même sens, soit en sens contraire. C'est ainsi que la main qui tire une corde marche dans la direction même de la corde; la force appliquée à une manivelle est constamment dirigée suivant la tangente à la circonférence que cette manivelle décrit; le corps qui est élevé à l'aide des moufles, ou de la chèvre, monte verticalement, c'est-à-dire en sens contraire de la direction de son poids. Mais il n'en est pas toujours ainsi, comme nous allons le voir.

Lorsqu'on fait monter un corps pesant le long d'un plan incliné, en exerçant une force de traction Q, dirigée parallèlement au plan (fig. 92), le point d'application D de cette force Q se déplace bien suivant sa direction; mais le centre de gravité G, auquel est appliquée la force verticale P, égale au poids du corps, ne se meut pas suivant la verticale. Les chemins parcourus par le

points d'application D et G des deux forces sont les mêmes, et cependant les forces Q et P ne sont pas égales, puisqu'elles sont entre elles dans le rapport de la hauteur AC du plan-incliné à sa longueur AB. Il semble donc que, dans ce cas, le principe énoncé au commencement du paragraphe précédent n'est plus vrai. Mais si, au lieu de prendre le déplacement total du point d'application de chaque force, on prend la quantité dont ce point s'est déplacé *dans la direction* de la force, on reconnaîtra que le principe dont on s'occupe est encore applicable. Lorsque le corps aura glissé sur le plan incliné, depuis le point B jusqu'au point A, il se sera élevé verticalement d'une hauteur égale à AC : en prenant cette hauteur pour le chemin parcouru par le point d'application de la force P, et la comparant à la longueur AB, parcourue en même temps par le point d'application de la force Q, on verra que, si d'une part la force Q est la moitié, le tiers, le quart du poids P, d'une autre part elle parcourt un chemin double, triple, quadruple du chemin parcouru par le point d'application de la force P, c'est-à-dire de la hauteur dont le corps s'élève en montant sur le plan incliné.

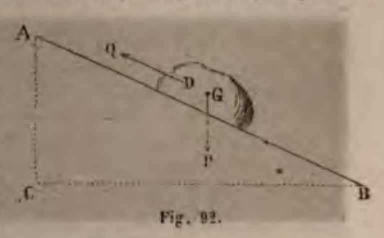


Fig. 92.

Toutes les fois que le point d'application A d'une force F (fig. 93 et 94), se déplacera en décrivant une ligne AB dirigée obliquement par rapport à la force, on abaissera du point B une perpendiculaire BC sur la direction de la force, et la distance AC sera ce qu'on appelle *le chemin parcouru par le point d'application de la force* F, *estimé suivant la direction de cette force*. En ayant soin de prendre toujours la ligne AC pour le déplacement du point d'application de la force, on reconnaîtra que le principe énoncé au commencement du § 70 est vrai dans tous les cas. Examinons, sous ce point de vue, le levier auquel sont appliquées des forces dirigées obliquement par rapport aux bras du levier.


Fig. 93. Fig. 94.

Pour l'équilibre de ce levier, il faut que les forces P et Q qui lui sont appliquées (fig 95) soient inversement proportionnelles

aux perpendiculaires Ca, Cb, abaissées du point d'appui C, sur les directions des deux forces. Lorsque le levier tournera d'une petite quantité autour du point d'appui C, le point A viendra en A′, et le point B en B′; les chemins parcourus par ces points, estimés suivant les directions des forces, seront AD, BE : et ce que nous devons démontrer, c'est que le rapport de AD à BE est le même que le rapport de Q à P. Pour y arriver, nous observerons que, les arcs de cercle AA′, BB′ étant très-petits, nous pourrons les regarder comme de petites lignes droites respectivement perpendiculaires à AC et BC. Le triangle ADA′ est semblable au triangle ACa, car ils ont leurs côtés perpendiculaires entre eux deux à deux : on en conclut donc la proportion



Fig. 95.

$$\frac{AD}{Ca} = \frac{AA'}{AC}.$$

Mais les triangles BEB′, BCb, sont aussi semblables, pour la même raison ; on en conclura donc de même

$$\frac{BE}{Cb} = \frac{BB'}{CB}.$$

D'ailleurs AA′ et BB′ étant des arcs de cercle correspondants à des angles au centre égaux entre eux, doivent être proportionnels aux rayons AC et CB ; les deux proportions qu'on vient d'écrire ont donc leurs derniers rapports égaux, en sorte que les premiers rapports forment la proportion suivante :

$$\frac{AD}{Ca} = \frac{BE}{Cb},$$

ou bien, en changeant l'ordre des deux moyens,

$$\frac{AD}{BE} = \frac{Ca}{Cb}.$$

Si enfin nous nous rappelons que les perpendiculaires Ca et Cb sont entre elles dans le rapport de Q à P, nous en conclurons

que AD et BE sont aussi entre eux dans le même rapport : c'est ce que nous voulions démontrer.

§ 72. Quelle que soit la complication d'une machine, dans laquelle deux forces se feraient équilibre, nous parviendrions toujours à vérifier, comme nous l'avons fait dans les exemples précédents, que *ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse*, en donnant à cet énoncé la signification qui résulte des développements dans lesquels nous venons d'entrer. La généralité de ce principe a été démontrée mathématiquement ; mais nous renverrons, pour la démonstration, aux traités de mécanique rationnelle (1). Les vérifications assez nombreuses que nous en avons faites, et que nous pourrions multiplier autant que nous voudrions, suffisent pour que nous l'admettions sans aucune difficulté. Nous regarderons donc désormais comme démontré que, *toutes les fois que deux forces agissant sur une machine se font équilibre, elles sont entre elles dans le rapport inverse des chemins parcourus en même temps par leurs points d'application, estimés suivant leurs directions respectives.*

On pourra même se servir de ce principe général pour trouver le rapport qui doit exister entre deux forces appliquées à une machine, pour qu'elles se fassent équilibre : nous allons en donner quelques exemples.

§ 73. **Presse à vis.** — La figure 96 représente une machine destinée à comprimer les corps et qu'on appelle *presse*. Une vis A s'engage dans un écrou B qui est fixe ; elle se termine à la partie inférieure par un renflement C, percé de deux trous qui sont dirigés perpendiculairement l'un sur l'autre. On introduit un levier dans un de ces trous, et, en agissant sur ce levier, on fait tourner la vis d'une certaine quantité ; puis on

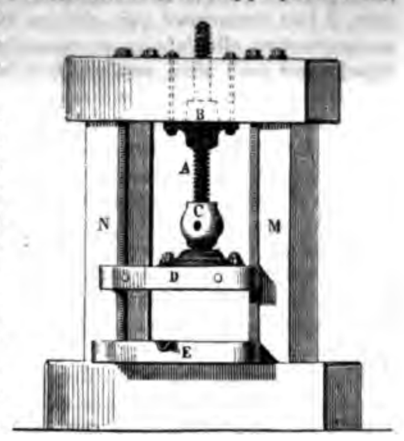


Fig. 96.

(1) Ce principe n'est autre chose que le principe des vitesses virtuelles, que Lagrange a adopté comme devant servir de base à la statique, ou à la science de l'équilibre des forces.

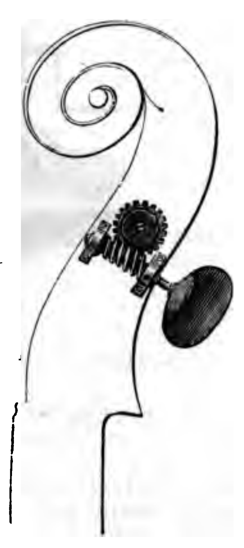
retire le levier, et, l'introduisant dans l'autre trou, on continue à faire tourner la vis, en sorte qu'on peut de cette manière lui faire faire autant de tours qu'on veut. Le mouvement de rotation ainsi produit fait monter ou descendre la vis, suivant qu'on la fait tourner dans un sens ou dans l'autre. Un plateau D suit son mouvement ascendant ou descendant, mais sans tourner avec elle : pour cela il est dirigé par les deux montants verticaux M et N, qui pénètrent dans deux échancrures pratiquées dans le plateau de part et d'autre. Un plateau fixe E est destiné à recevoir les corps qui doivent être comprimés. On aperçoit une espèce de bec sur le bord antérieur de ce plateau fixe : il correspond à une rigole qui existe tout autour de sa face supérieure, et est destiné à l'écoulement du liquide que la compression peut faire sortir du corps soumis à l'action de la presse.

Lorsqu'on fait tourner la vis dans le sens convenable, elle fait descendre le plateau D, qui vient ainsi s'appuyer sur le corps qui a été placé sur le plateau fixe : et, en continuant à agir sur la vis, on exerce sur ce corps une pression qui peut devenir extrêmement grande. Pour se faire une idée de la grandeur de cette pression, il faut remarquer que, chaque fois qu'on fait faire à la vis un tour entier, elle s'abaisse en même temps d'une quantité qu'on appelle son *pas* : ainsi, pendant que le point d'application de la puissance décrit une circonférence de cercle dont le rayon est égal à la longueur du levier, le point d'application de la résistance marche d'une quantité égale au pas de la vis. Le principe énoncé dans le § 72 nous autorise à en conclure que : le rapport de la puissance à la résistance est le même que le rapport du pas de la vis à la circonférence qui a pour rayon la longueur du levier. Si l'on pense à la petitesse du pas de la vis, relativement à cette circonférence, on verra qu'à l'aide d'une force assez faible, appliquée à l'extrémité du levier, on peut exercer une pression extrêmement grande sur le corps placé entre les deux plateaux.

§ 74. **Vis sans fin.** — On dispose quelquefois une vis à côté d'une roue dentée, de manière que le filet de la vis s'engage entre les dents de la roue, et que lorsque la vis tourne, elle fait nécessairement tourner la roue. C'est ce que l'on nomme l'*engrenage de la vis sans fin*. Lorsqu'une vis ordinaire s'engage dans un écrou, et qu'on la fait tourner dans cet écrou, elle s'y enfonce progressivement, et il arrive bientôt un moment où l'on ne peut plus la faire tourner dans le même sens, parce que l'écrou se trouve à l'extrémité du filet de la vis. Ici il n'en est pas de même;

on peut faire tourner indéfiniment la vis, et elle fera toujours tourner la roue de la même manière. C'est de là que lui vient le nom de *vis sans fin*.

La figure 97 montre une vis sans fin adaptée à une contre-basse, pour serrer une des cordes de cet instrument. La vis engrène avec une roue qui porte 20 dents, et cette roue est fixée à un petit cylindre sur lequel s'enroule la corde. Lorsque la vis fait un tour entier, la roue avance d'une dent : en sorte que la roue tourne 20 fois moins vite que la vis. Il résulte de là que l'effort que la main exerce sur la poignée qui termine la vis, pour serrer la corde, est 20 fois plus petit que celui qui serait nécessaire pour produire le même effet, si cette poignée était directement adaptée au cylindre sur lequel la corde s'enroule.


Fig. 97.

§ 75. **Treuil différentiel.** — On a vu dans le § 54 (page 49) que, pour qu'il y ait équilibre entre la puissance et la résistance appliquées à un treuil, il faut que le rapport de ces deux forces soit égal au rapport du rayon de treuil au bras de levier de la puissance. On conçoit qu'à l'aide d'une pareille machine, on puisse, avec une puissance donnée, faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on voudra; puisqu'il suffit, pour cela, de prendre un treuil dont le rayon soit assez petit relativement au bras de levier de la puissance. Mais, en réalité, il y a des limites qu'il est impossible de dépasser: d'une part, on ne peut pas augmenter outre mesure la longueur du levier sur lequel doit agir la puissance, sans quoi on aurait une machine extrêmement gênante et difficile à manœuvrer; d'une autre part, on ne peut pas trop diminuer le rayon du treuil, car il ne conserverait plus une solidité suffisante pour ne pas se briser sous l'effort de la résistance à vaincre. Le treuil différentiel a été imaginé pour produire ce que l'on ne peut pas obtenir avec le treuil ordinaire; avec le treuil différentiel, on peut sans difficulté faire équilibre à une résistance aussi grande que possible, à l'aide d'une puissance aussi petite qu'on voudra.

Ce treuil ne diffère du treuil ordinaire, qu'en ce que sa surface

est formée de deux cylindres de rayons inégaux (fig. 98), au lieu d'un seul. Une corde est attachée par une de ses extrémités sur le plus gros des deux cylindres; après s'y être enroulée de quel-

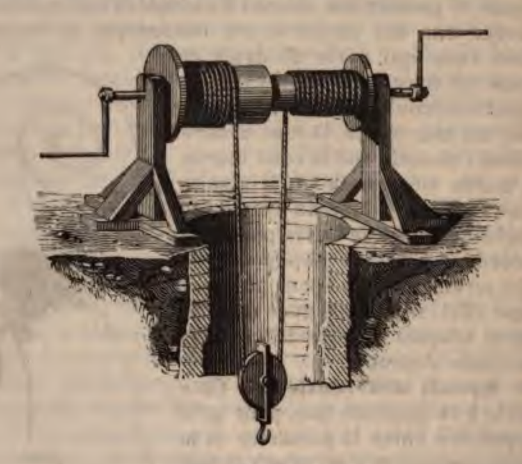


Fig. 98.

ques tours, elle s'en détache, vient passer sous la gorge d'une poulie mobile, puis remonte et s'enroule sur le plus petit des deux cylindres, auquel elle est attachée par sa seconde extrémité. Le corps qui doit être soulevé est suspendu à la chape de la poulie mobile. Des manivelles adaptées aux extrémités du treuil servent à le faire tourner. La corde est disposée, sur les deux parties du treuil, de telle façon que, lorsqu'on le fait tourner dans un sens ou dans l'autre, elle s'enroule d'un côté et se déroule en même temps de l'autre côté. Pour faire monter le corps suspendu à la poulie, on fait tourner le treuil de manière que la corde s'enroule sur le gros cylindre, et se déroule sur le petit. Supposons, par exemple, qu'on ait fait faire deux tours au treuil : la portion de la corde qui s'en détache pour soutenir la poulie se sera raccourcie, d'un côté, de deux fois la circonférence du gros cylindre, et elle se sera allongée en même temps, de l'autre côté, de deux fois la circonférence du petit : donc elle ne sera raccourcie, en réalité, que de deux fois la différence qui existe entre les circonférences des deux cylindres. Cette diminution de longueur de la partie libre de la corde, se répartissant également entre les

deux cordons qui soutiennent la poulie, et qui peuvent être regardés comme parallèles, il en résulte que la poulie aura monté d'une quantité égale à la différence des circonférences des deux cylindres. Ainsi, pendant que le point d'application de la puissance parcourt deux circonférences ayant pour rayon le bras d'une des manivelles, le point d'application de la résistance ne marche que de la différence entre les circonférences des deux parties cylindriques du treuil. Si nous appliquons donc le principe du § 72, et que nous observions que les circonférences sont entre elles dans le même rapport que leurs rayons, nous serons conduits à la proposition suivante : *Dans le treuil différentiel, la puissance est à la résistance comme la différence des rayons des deux cylindres du treuil est au double de la longueur du levier à l'extrémité duquel la puissance est appliquée.*

On reconnaît par là l'exactitude de ce qui a été annoncé plus haut, c'est-à-dire qu'avec le treuil différentiel, une puissance donnée peut faire équilibre à une résistance aussi grande qu'on veut : puisqu'il suffit, pour cela, de diminuer suffisamment la différence entre les rayons des deux parties cylindriques du treuil, ce qui n'empêchera pas de lui donner la solidité convenable, et ne le rendra pas plus gênant à employer.

§ 76. **Balance de Roberval.** — Roberval a imaginé une balance très-ingénieuse dont l'usage s'est considérablement répandu depuis quelques années. Elle est représentée ici (fig. 99).



Fig. 99.

Ce qui fait que cette balance est préférée à la balance ordinaire (fig. 53, page 40), c'est que les plateaux n'y sont pas, comme dans celle-ci, embarrassés par les chaines de suspension, et qu'on peut

en conséquence y placer bien plus facilement les corps que l'on veut peser.

Voici le principe sur lequel sa construction est basée. Imaginons un parallélogramme ABCD (fig. 100), formé par quatre tiges

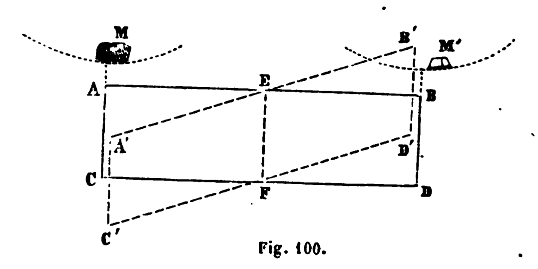


Fig. 100.

solides AB,AC,BD,CD articulées les unes aux autres à leurs points de jonction; et concevons que les milieux E, F, des côtés AB,CD, soient maintenus l'un et l'autre dans une position invariable, mais que les deux côtés AB,CD puissent tourner, chacun séparément, sans aucune difficulté, autour de ces points E, F. Si l'on déforme le parallélogramme, en faisant tourner le côté AB autour du point E, de manière à l'amener en A'B', le côté inférieur CD prendra la position C'D'; et les deux autres côtés, qui seront venus en A'C',B'D', ne cesseront pas d'être, comme précédemment, parallèles à la ligne EF : si les deux points E, F sont situés sur une même verticale, les côtés AC, BD, resteront verticaux, de quelque manière que l'on déforme le parallélogramme ABCD. De plus il est aisé de voir que la quantité dont un point quelconque de AC s'est abaissé verticalement, quand AC est venu en A'C', est précisément égale à la quantité dont un des points de BD s'est élevé en même temps. On voit d'après cela, et en appliquant le principe du § 72, que si les deux tiges AC, BD sont surmontées de deux plateaux chargés de deux corps pesants, M, M', pour que l'appareil tout entier reste en équilibre dans la position ABCD, il est de toute nécessité que les poids de ces deux corps M, M' soient égaux : puisque ces poids doivent être entre eux dans le rapport inverse des quantités dont ils se déplacent en même temps suivant la verticale, quand on abaisse l'un des plateaux, et que par conséquent on fait monter l'autre.

Pour réaliser cet appareil, il fallait trouver le moyen d'en exécuter les diverses pièces de manière à conserver à tout l'ensemble une très-grande mobilité, condition indispensable pour qu'il puisse servir à déterminer les poids des corps avec une certaine

précision. Si l'on avait disposé en A, B, C, D, de simples articulations à charnière, cela n'aurait pas suffi, à cause des frottements qui s'y seraient développés, et qui auraient détruit toute la sensibilité de l'appareil. Voici la disposition qu'on a adoptée. On a donné à AB la forme du fléau d'une balance ordinaire ; ce fléau s'appuie en E sur un support fixe, au moyen d'un couteau, et les tiges verticales AC, BD s'appuient l'une et l'autre sur les extrémités A et B du fléau, au moyen de couteaux dont ces tiges sont munies. Le côté inférieur CD du parallélogramme est disposé comme l'indique la figure 101 qui le représente vu en dessus. La

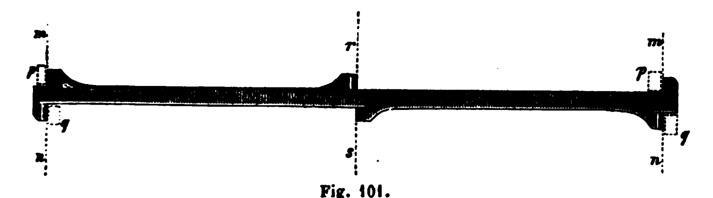


Fig. 101.

figure 102 montre une partie de la même pièce, vue en perspective, ainsi qu'une sorte d'étrier H dans lequel s'engage l'extrémité K de cette pièce, et par lequel chacune des tiges AC, BD, se termine inférieurement ; on voit que, à chaque bout (fig. 101), existent deux couteaux, dont les arêtes, tournées en sens contraire l'une de l'autre, se trouvent sur une même ligne droite *mn*; ces couteaux sont destinés à s'appuyer contre les montants *p*, *q*, de l'étrier H. En outre cet étrier présente lui-même un couteau dont l'arête, tournée vers le haut, est destinée à supporter l'extrémité K, en la touchant par les

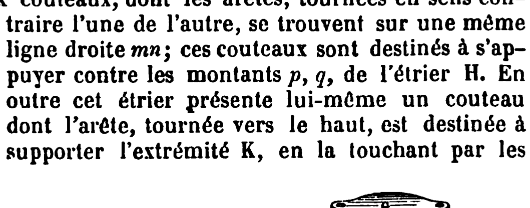


Fig. 102.

points de sa face inférieure qui sont précisément sur la ligne *mn* formée par les deux couteaux dont elle est munie. Par suite de cette disposition, les angles formés par le côté inférieur CD du parallélogramme avec les tiges verticales AC, BD, peuvent varier l'un et l'autre avec la plus grande facilité ; puisque ces pièces ne se touchent, soit en C, soit en D, que par des points situés tous sur

une même ligne droite *mn*. La pièce CD étant soutenue à ses deux extrémités par les étriers, tels que H, qui terminent les tiges AC, BD, il suffit de s'opposer à ce que son milieu F puisse se mouvoir dans le sens horizontal, pour que ce point reste fixe : c'est ce qu'on obtient au moyen de deux couteaux, dont les arêtes, tournées en sens contraire l'une de l'autre, et dirigées suivant une même ligne droite *rs* (fig. 101), s'appuient contre les montants d'une sorte d'étrier fixe G (fig. 102). Toute la partie inférieure du mécanisme que nous venons de décrire est habituellement cachée à l'intérieur du support fixe de la balance.

§ 77. **Travail des forces.** — En vertu du principe du § 72, dont nous venons de donner quelques applications, si une puissance et une résistance se font équilibre sur une machine, et que le chemin parcouru par la puissance, estimé suivant sa direction, soit 2 fois, 3 fois, 10 fois plus grand que celui que parcourt la résistance, estimé également suivant sa direction, la puissance doit être 2 fois, 3 fois, 10 fois plus petite que la résistance. Il en résulte que, si l'on multiplie le nombre de kilogrammes qui représente la puissance, par le nombre de mètres qui représente le chemin parcouru par son point d'application, estimé suivant sa direction, et qu'on en fasse autant pour la résistance, les deux nombres qu'on trouvera par ces deux multiplications seront exactement les mêmes.

On nomme *travail d'une force* le produit ainsi obtenu, en multipliant la force, évaluée en kilogrammes, par le chemin que parcourt son point d'application, estimé suivant sa direction, et évalué en mètres. On énoncera donc de la manière suivante la proposition dont il vient d'être question : *Lorsqu'une puissance et une résistance se font équilibre sur une machine, le travail développé par la puissance, pendant un temps déterminé, est égal au travail développé par la résistance, pendant le même espace de temps.*

§ 78. Pour justifier l'expression de travail employée ici, nous allons faire voir que le produit, auquel nous donnons ce nom, peut en effet servir de mesure à ce que l'on entend habituellement par le mot *travail*. D'abord, si l'on réfléchit aux divers travaux effectués, soit par les machines, telles que les roues hydrauliques et les machines à vapeur, soit par les animaux, soit par les hommes, lorsqu'ils ont à employer leur force musculaire, on reconnaîtra qu'il s'agit toujours de déplacer les points d'application des résistances à vaincre. Ainsi le travail consistera à élever des corps pesants, tels que des pierres, de l'eau ; à changer les positions respectives des molécules d'un corps solide, comme dans le martelage du fer chaud et du cuivre : à séparer ces mo-

lécules, comme dans le travail du bois, de la pierre, dans la mouture des grains. Dans ces différents cas, et dans tous les autres qu'on pourrait indiquer, le travail ne consiste pas seulement à faire équilibre à une résistance, mais encore à déplacer le point d'application de cette résistance. L'idée de travail comprend donc à la fois l'idée d'une résistance vaincue, et l'idée d'un chemin parcouru par son point d'application.

La grandeur du travail effectué par un ouvrier, c'est-à-dire ce qui doit servir de base à la somme qu'on lui paie, dépend évidemment des deux éléments que nous venons de trouver dans l'idée de travail. Si deux ouvriers sont employés à élever des terres à la pelle, d'un niveau à un autre (fig. 103), et que l'un



Fig. 103.

d'eux en élève deux fois plus que l'autre, il est clair qu'il aura effectué un travail double, et qu'en conséquence il devra recevoir un salaire double de celui que recevra l'autre ouvrier. De même si l'un de ces ouvriers élève une certaine quantité de terre à 2 mètres de hauteur, tandis que l'autre élève la même quantité à 1 mètre seulement, le premier aura fait un travail double du travail fait par le second, et devra être payé deux fois plus. On voit donc que, à égalité de force vaincue, le travail est proportionnel à la grandeur du chemin qu'on a fait parcourir au point d'application de cette force, estimé suivant sa direction ; et aussi que, à égalité de chemin parcouru, le travail est proportionnel à la grandeur de la résistance vaincue. Il en résulte nécessairement que le travail est proportionnel au produit de la résistance

une même ligne droite *mn*. La pièce CD étant soutenue à ses deux extrémités par les étriers, tels que H, qui terminent les tiges AC, BD, il suffit de s'opposer à ce que son milieu F puisse se mouvoir dans le sens horizontal, pour que ce point reste fixe : c'est ce qu'on obtient au moyen de deux couteaux, dont les arêtes, tournées en sens contraire l'une de l'autre, et dirigées suivant une même ligne droite *rs* (fig. 101), s'appuient contre les montants d'une sorte d'étrier fixe G (fig. 102). Toute la partie inférieure du mécanisme que nous venons de décrire est habituellement cachée à l'intérieur du support fixe de la balance.

§ 77. **Travail des forces.** — En vertu du principe du § 72, dont nous venons de donner quelques applications, si une puissance et une résistance se font équilibre sur une machine, et que le chemin parcouru par la puissance, estimé suivant sa direction, soit 2 fois, 3 fois, 10 fois plus grand que celui que parcourt la résistance, estimé également suivant sa direction, la puissance doit être 2 fois, 3 fois, 10 fois plus petite que la résistance. Il en résulte que, si l'on multiplie le nombre de kilogrammes qui représente la puissance, par le nombre de mètres qui représente le chemin parcouru par son point d'application, estimé suivant sa direction, et qu'on en fasse autant pour la résistance, les deux nombres qu'on trouvera par ces deux multiplications seront exactement les mêmes.

On nomme *travail d'une force* le produit ainsi obtenu, en multipliant la force, évaluée en kilogrammes, par le chemin que parcourt son point d'application, estimé suivant sa direction, et évalué en mètres. On énoncera donc de la manière suivante la proposition dont il vient d'être question : *Lorsqu'une puissance et une résistance se font équilibre sur une machine, le travail développé par la puissance, pendant un temps déterminé, est égal au travail développé par la résistance, pendant le même espace de temps.*

§ 78. Pour justifier l'expression de travail employée ici, nous allons faire voir que le produit, auquel nous donnons ce nom, peut en effet servir de mesure à ce que l'on entend habituellement par le mot *travail*. D'abord, si l'on réfléchit aux divers travaux effectués, soit par les machines, telles que les roues hydrauliques et les machines à vapeur, soit par les animaux, soit par les hommes, lorsqu'ils ont à employer leur force musculaire, on reconnaîtra qu'il s'agit toujours de déplacer les points d'application des résistances à vaincre. Ainsi le travail consistera à élever des corps pesants, tels que des pierres, de l'eau ; à changer les positions respectives des molécules d'un corps solide, comme dans le martelage du fer chaud et du cuivre : à séparer ces mo-

lécules, comme dans le travail du bois, de la pierre, dans la mouture des grains. Dans ces différents cas, et dans tous les autres qu'on pourrait indiquer, le travail ne consiste pas seulement à faire équilibre à une résistance, mais encore à déplacer le point d'application de cette résistance. L'idée de travail comprend donc à la fois l'idée d'une résistance vaincue, et l'idée d'un chemin parcouru par son point d'application.

La grandeur du travail effectué par un ouvrier, c'est-à-dire ce qui doit servir de base à la somme qu'on lui paie, dépend évidemment des deux éléments que nous venons de trouver dans l'idée de travail. Si deux ouvriers sont employés à élever des terres à la pelle, d'un niveau à un autre (fig. 103), et que l'un



Fig. 103.

d'eux en élève deux fois plus que l'autre, il est clair qu'il aura effectué un travail double, et qu'en conséquence il devra recevoir un salaire double de celui que recevra l'autre ouvrier. De mêmes si l'un de ces ouvriers élève une certaine quantité de terre à 2 mètres de hauteur, tandis que l'autre élève la même quantité à 1 mètre seulement, le premier aura fait un travail double du travail fait par le second, et devra être payé deux fois plus. On voit donc que, à égalité de force vaincue, le travail est proportionnel à la grandeur du chemin qu'on a fait parcourir au point d'application de cette force, estimé suivant sa direction ; et aussi que, à égalité de chemin parcouru, le travail est proportionnel à la grandeur de la résistance vaincue. Il en résulte nécessairement que le travail est proportionnel au produit de la résistance

plusieurs forces résistantes, la force motrice devra faire, à elle seule, équilibre à toutes les résistances. On peut imaginer que cette puissance unique soit décomposée en plusieurs puissances partielles, appliquées au même point, suivant la même direction, et dont chacune fasse séparément équilibre à une des résistances. Dans chacun des groupes partiels, ainsi formé d'une portion de la puissance et d'une des résistances, on trouvera que le travail moteur est égal au travail résistant; donc, en réunissant toutes les quantités de travail correspondant à ces divers groupes, on reconnaîtra que la somme des travaux moteurs développés par les diverses portions de la puissance, ou, ce qui est évidemment la même chose, le travail moteur développé par la puissance tout entière, est égal à la somme des travaux résistants produits par les diverses résistances.

S'il y a plusieurs forces motrices et plusieurs forces résistantes, appliquées à la fois à une machine animée d'un mouvement uniforme, toutes ces forces se neutraliseront encore mutuellement. Chacune des premières pourra être regardée comme faisant équilibre à une portion des résistances, et le travail moteur qu'elle produira sera égal à la somme des travaux résistants produits par la portion des résistances à laquelle elle fait équilibre. Donc, en réunissant toutes les quantités de travail, tant moteur que résistant, on trouvera que la somme des travaux moteurs développés par les diverses forces motrices est égale à la somme des travaux résistants développés par les diverses résistances.

La somme des travaux moteurs produits par les diverses forces qui agissent sur une machine s'appelle, par abréviation, le *travail moteur total*; il en est de même pour la somme des travaux résistants. En sorte qu'on peut dire en général : *Lorsqu'une machine est soumise à l'action d'un nombre quelconque de forces, et que son mouvement est uniforme, le travail moteur total, correspondant à un intervalle de temps quelconque, est égal au travail résistant total correspondant au même intervalle de temps.*

Cette proposition, d'une extrême importance pour l'étude des machines, peut être regardée comme renfermant en elle tout ce que nous avons dit sur les machines considérées à l'état de mouvement uniforme; on ne devra jamais la perdre de vue, si l'on ne veut pas s'exposer à tomber dans de graves erreurs.

PRODUCTION ET MODIFICATION DU MOUVEMENT PAR LES FORCES.

§ 82. Lorsqu'une machine ne se meut pas uniformément, les forces qui lui sont appliquées ne se font plus équilibre. Elles peuvent bien se neutraliser en partie ; mais il est nécessaire que les forces motrices l'emportent sur les résistances, ou réciproquement, que les résistances soient trop grandes pour être équilibrées par les forces motrices : car, sans cela, il n'existerait aucune cause qui pût modifier le mouvement de la machine, et ce mouvement resterait …iforme. Pour se rendre bien compte de l'influence que le déf… t d'équilibre des forces appliquées à une machine peut avoir … ır son mouvement, il faut connaître les lois d'après lesquelle… …s forces produisent et modifient le mouvement des corps s… lesquels elles agissent. Nous allons nous occuper de l'étude … lois. Pour cela nous observerons le mouvement des corps … tombent librement sous l'action de la pesanteur, et nous …ndrons, par analogie, les résultats que nous aurons ob… ıus à l'action de toutes les autres forces.

§ 83. **Chute des corps.** — Un corps qu'on tient dans la main, et qu'on abandonne ensuite, tombe immédiatement, jusqu'à ce qu'il ait rencontré un obstacle qui s'oppose à la continuation de son mouvement. Tous les corps ainsi abandonnés à eux-mêmes n'emploient pas le même temps à tomber d'une même hauteur ; ils tombent avec des vitesses très-inégales. C'est ainsi qu'une balle de plomb, une pierre, tombent avec une grande rapidité, tandis qu'une plume légère, un flocon de neige, une bulle de savon, mettent un temps beaucoup plus long à parcourir la même distance. Mais ces différences de vitesse sont dues exclusivement à la résistance que l'air oppose au mouvement de ces divers corps, résistance qui se fait sentir beaucoup plus sur les uns que sur les autres. C'est ce qu'on peut mettre complétement en évidence par l'expérience suivante.

On prend un gros tube de verre, d'environ 2 mètres de longueur, fermé à ses deux extrémités par deux montures de cuivre; une de ces deux montures est munie d'un robinet qui permet de faire communiquer l'intérieur du tube avec l'air extérieur, et dont l'ouverture présente intérieurement un filet de vis. On introduit dans le tube de petits corps de diverses natures, tels

que des morceaux de plomb et de papier, de petites feuilles d'or, des barbes de plumes; puis, à l'aide du filet de vis dont il est muni, on fixe ce tube au centre de la platine d'une machine pneumatique (fig. 106); on ouvre le robinet, et l'on retire l'air contenu dans l'intérieur du tube, en manœuvrant la machine (nous verrons plus tard en quoi consiste cette machine, et comment on s'en sert pour faire le vide). Lorsqu'il ne reste plus dans le tube qu'une quantité d'air insignifiante, on ferme le robinet, on dévisse le tube, puis on le retourne brusquement pour le mettre dans la position indiquée par la figure 107. Les petits corps, qui se trouvaient au bas du tube dans sa première position, sont ainsi portés rapidement à la partie supérieure de l'espace où l'on a fait le vide, et on les voit tomber tous de la même manière : partis ensemble de l'une des extrémités du tube, ils arrivent ensemble à l'autre extrémité. Mais si l'on ouvre un peu le robinet, pour laisser rentrer une petite quantité d'air, qu'on le referme presque aussitôt, et qu'on recommence à retourner brusquement le tube, on verra que le phénomène a déjà changé : les morceaux de plomb arrivent les premiers en bas du tube, et les corps plus légers y arrivent ensuite, les uns après les autres, suivant qu'ils ont été plus ou moins retardés par l'air qu'on a laissé rentrer. Ce retard sera d'autant plus marqué que l'on aura laissé rentrer plus d'air, et le phénomène prendra toute son intensité lorsque le robinet sera maintenu ouvert.

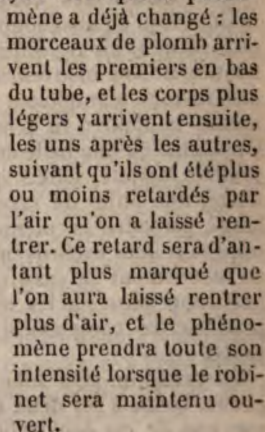


Fig. 106.

Il résulte de cette expérience que tous les corps tombent avec la même rapidité dans le vide, et que, lorsqu'ils tombent dans

l'air, la résistance qu'ils en éprouvent est la seule cause qui les fait tomber avec des vitesses très-différentes. Nous verrons même, plus tard, que l'air est également la seule cause qui fait que certains corps tels que les ballons, les nuages, la fumée, semblent soustraits à l'action de la pesanteur, et montent souvent au lieu de tomber; sans la présence de l'air, les ballons, les nuages, la fumée tomberaient avec la même rapidité qu'une pierre ou une balle de plomb.


Fig. 107.

Pour étudier ce qui, dans la chute d'un corps, est dû uniquement à l'action de la pesanteur, il serait bon d'observer cette chute dans un espace vide d'air ; mais, comme l'expérience serait difficile à réaliser, et que, d'un autre côté, l'effet de la résistance de l'air est extrêmement faible, lorsqu'elle s'exerce sur des corps qui, sous une petite surface, ont un poids un peu grand, on se contente d'observer le mouvement que de pareils corps prennent dans l'air.

§ 84. **Plan incliné de Galilée.** — Si l'on pense à la rapidité avec laquelle tombe une balle de plomb, on reconnaîtra qu'il est, pour ainsi dire, impossible d'observer les espaces qu'elle parcourt, pendant les secondes successives qui s'écoulent depuis le commencement de sa chute. Ce qu'on ne peut pas faire d'une manière directe, on le fait en employant des moyens détournés. Nous allons voir d'abord en quoi consiste le moyen dont Galilée s'est servi pour découvrir les lois de la chute des corps, lois qui étaient inconnues avant lui (cette découverte date de l'an 1600 environ).

Nous avons vu dans le § 63 (page 71) que, lorsqu'un corps pesant est posé sur un plan incliné, son poids se décompose en deux forces, dont l'une est dirigée perpendiculairement au plan, et l'autre parallèlement à ce plan. La première composante ne tend qu'à appuyer le corps sur le plan, sans agir en aucune manière pour le faire mouvoir dans un sens plutôt que dans l'autre. La deuxième composante, au contraire, qui est dirigée parallèlement au plan, peut produire tout son effet, et elle fera descendre le corps le long du plan, si elle n'est pas détruite par une force qui lui soit égale et directement opposée. Le rapport de cette composante au poids total du corps est le même que

celui de la hauteur du plan incliné à sa longueur (§ 63) : le corps, pouvant céder librement à l'action de cette composante, se mouvra donc exactement de la même manière que s'il tombait verticalement, et que l'intensité de la pesanteur eût été diminuée dans le rapport de la longueur du plan incliné à sa hauteur. Ainsi, en se servant d'un plan incliné dont la hauteur soit dix fois plus petite que sa longueur, on observera un mouvement tout à fait pareil à celui que prendraient les corps en tombant librement, si la pesanteur était dix fois plus petite qu'elle n'est réellement.

Ce moyen ingénieux de diminuer, pour ainsi dire à volonté, l'intensité de la pesanteur, et de diminuer en conséquence la rapidité du mouvement qu'elle occasionne, a été réalisé par Galilée de la manière suivante. Une corde bien unie, de 10 à 12 mètres de longueur, était fortement tendue entre deux points A et B, dont le premier était plus élevé que le second (fig. 108); deux

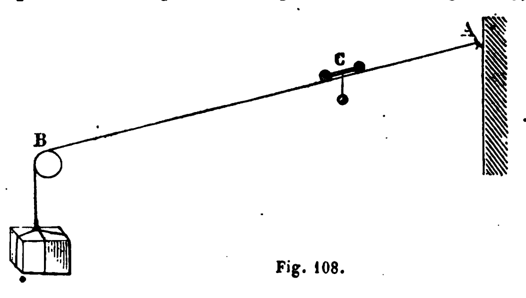


Fig. 108.

petites poulies métalliques C, unies par une même chape, étaient posées sur la corde, et un petit poids, suspendu à cette chape, les empêchait de tomber d'un côté ou de l'autre. Les poulies, la chape et le poids formaient une espèce de petit chariot, pouvant descendre le long de la corde, sans éprouver de résistance bien sensible; et il était facile d'observer le chemin que ce mobile parcourait pendant la 1re, la 2e, la 3e seconde, à partir du commencement de son mouvement.

§ 85. **Machine d'Atwood.** — Atwood, physicien anglais, a imaginé, pour observer les lois de la chute des corps, une machine qui est plus commode que le plan incliné de Galilée. Voici en quoi elle consiste.

Un fil de soie très-délié passe dans la gorge d'une poulie extrêmement mobile, qu'on aperçoit à la partie supérieure de la machine (fig. 109), et supporte, à ses deux extrémités, deux

corps de même poids. La mobilité de la poulie est obtenue par un mode particulier de suspension de son axe, qui repose sur les circonférences de quatre roues placées, deux en avant, deux en arrière (nous reviendrons plus tard sur ce mode de suspension). Les deux corps attachés aux deux bouts du fil ayant exactement le même poids, la poulie reste immobile, puisque les deux forces qui lui sont appliquées se font équilibre ; mais, si l'on vient à ajouter un petit poids d'un côté, l'équilibre sera troublé, et le fil se mettra en mouvement, en faisant tourner la poulie. Supposons, pour fixer les idées, que les deux corps suspendus primitivement aux deux extrémités du fil pèsent chacun $4^{gr}\frac{1}{2}$, et que le poids additionnel qui détermine le mouvement soit de 1^{gr}. Qu'il y ait équilibre ou mouvement, les poids des deux premiers corps se neutralisent toujours, par l'intermédiaire de la poulie ; la force de 1^{gr} produit seule le mouvement des trois corps, qui pèsent ensemble 10^{gr} : ce mouvement sera donc le même que si les trois corps tombaient librement, et que l'intensité de la pesanteur ait été rendue dix fois plus petite. Si les poids des deux premiers corps étaient de $49^{gr}\frac{1}{2}$ chacun, et que le poids additionnel fût toujours de 1^{gr}, on reconnaîtra encore que le mouvement produit serait le

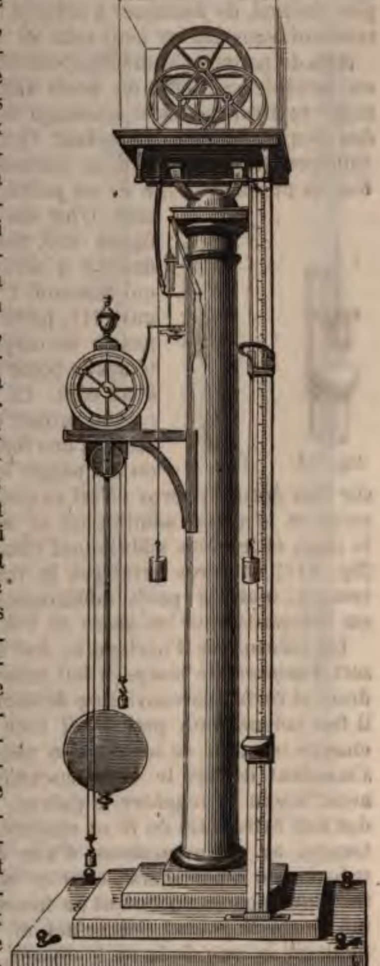
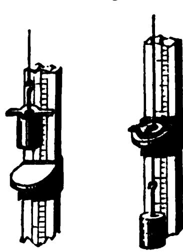


Fig. 109.

même que si les trois corps tombaient librement, et que l'intensité de la pesanteur ait été rendue cent fois plus petite. On voit, par là, que la machine d'Atwood permet, tout aussi bien que le plan incliné, de diminuer à volonté le mouvement des corps qui tombent, sans altérer pour cela les lois de ce mouvement.

Afin de pouvoir étudier facilement les lois du mouvement qui est produit par l'effet du poids additionnel, on a disposé une règle verticale, dans le voisinage de la ligne que parcourt l'un des deux corps en descendant. Cette règle est divisée en centimètres, et munie de deux curseurs, dont chacun peut être fixé en un quelconque de ses points, à l'aide d'une vis de pression. L'un des curseurs, représenté par la figure 110, porte un disque plein qui est destiné à arrêter le mouvement du corps qui descend. L'autre, représenté par la figure 111, porte un anneau destiné à laisser passer ce corps, mais à arrêter en même temps le poids additionnel, qui est allongé à cet effet. Ce poids additionnel présente en son milieu une petite ouverture circulaire, et une fente latérale à travers laquelle on fait passer le fil lorsqu'on veut le poser sur l'un des deux corps : c'est ce que montre la figure 110, où le corps et le poids additionnel se meuvent ensemble. Lorsque le corps et le poids additionnel viennent à rencontrer l'anneau (fig. 111), le corps principal le traverse et continue son mouvement; mais le poids additionnel est arrêté, et repose par ses extrémités sur les bords de l'anneau.


Fig. 110. Fig. 111.

Un mécanisme d'horlogerie, fixé à la colonne de la machine, sert à mesurer le temps. Il fait mouvoir une aiguille sur un cadran, et lui fait parcourir une division en une seconde; en outre, il fait entendre un petit bruit bien net au commencement de chaque seconde, de sorte qu'on peut compter les secondes qui s'écoulent depuis le commencement d'une expérience, sans avoir besoin de regarder le cadran. Afin que les corps suspendus aux extrémités du fil se mettent en mouvement bien exactement au commencement d'une des secondes que marque le mécanisme d'horlogerie, c'est ce mécanisme lui-même qui détermine le commencement du mouvement. A cet effet, le corps qui porte le poids additionnel, et qui, en descendant, doit se mouvoir le long de la règle divisée, est soutenu par l'extrémité aplatie d'un doigt métallique; ce doigt, mobile autour d'un axe horizontal, est maintenu au-dessous du corps par un assem-

blage de tringles, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas ; mais, au moment où l'aiguille du mécanisme d'horlogerie arrive à la division du cadran qui est verticalement au-dessus de son centre, le doigt s'abaisse brusquement, et le mouvement du corps commence à se produire. Il est clair que, pour la commodité des observations, le zéro de la graduation de la règle divisée doit être au niveau de la partie inférieure du corps, lorsqu'il est maintenu immobile par le doigt dont on vient de parler.

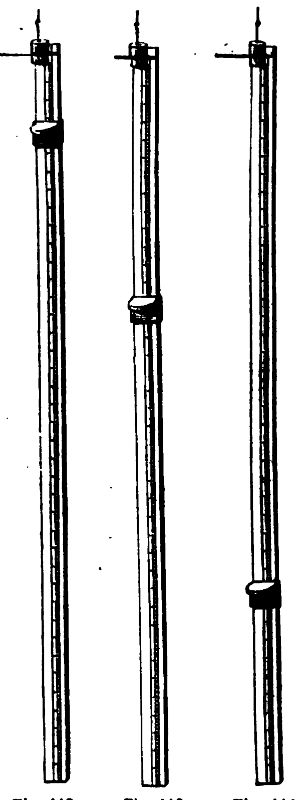


Fig. 112. Fig. 113. Fig. 114.

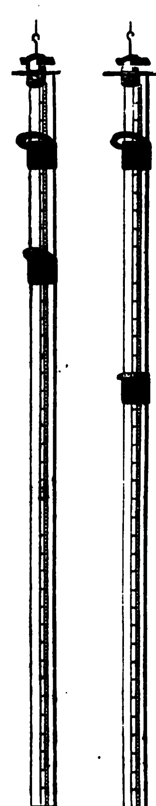
§ 86. **Lois de la chute des corps.** — Une première expérience à faire, à l'aide de la machine d'Atwood, consiste à observer les chemins parcourus par les corps mobiles, pendant 1 seconde, 2 secondes, 3 secondes..... à partir du commencement de leur mouvement. Pour cela on place le curseur à disque plein de manière que sa face supérieure se trouve de 16 centimètres au-dessous du zéro de la règle divisée (fig. 112) ; puis on cherche par le tâtonnement quelle doit être la grandeur du poids additionnel, pour que le corps qui est soutenu par le doigt parcoure ces 16 centimètres exactement en une seconde : on le reconnaît à ce que le corps, parti au commencement d'une seconde, vient choquer le disque du curseur au commencement de la seconde suivante.

On abaisse ensuite le curseur, jusqu'à ce qu'il soit à 64 centimètres au-dessous du zéro (fig. 113), et l'on voit que le corps mis en mouvement par le même poids additionnel emploie deux secondes à aller de son point de départ au point où le disque l'arrête. En abaissant encore le curseur de manière à l'amener à $1^m,44$ du zéro (fig. 114), et recommençant l'expérience, on voit

que trois secondes sont employées par le corps pour parcourir cette nouvelle distance.

Ainsi, d'après ces expériences :
en 1ˢ, le corps parcourt 0ᵐ,16;
en 2ˢ,........ il parcourt 0ᵐ,64, c'est-à-dire 4 fois plus ;
en 3ˢ,........ il parcourt 1ᵐ,44, c'est-à-dire 9 fois plus.

Il en résulte que *les espaces parcourus par un corps qui tombe librement sous l'action de la pesanteur, et mesurés depuis son point de départ, sont entre eux comme les carrés des temps employés par le corps à les parcourir.* On voit par là que nous avons eu raison, dans le § 12, de donner le mouvement d'un corps qui tombe comme exemple du mouvement varié, puisque les espaces qu'il parcourt ne sont pas proportionnels aux temps qu'il met à les parcourir.


Fig. 115. Fig. 116.

§ 87. Nous avons indiqué, dans le même paragraphe, ce que c'est que la vitesse dans un mouvement varié, à un moment déterminé; nous avons dit qu'on devait entendre par là la vitesse du mouvement uniforme qui se produirait, si, à partir de l'instant qu'on considère, le mouvement cessait de se modifier. La machine d'Atwood permet, comme nous allons le voir, de réaliser ce que suppose cette définition. Lorsque les deux corps, suspendus aux deux extrémités du fil, sont mis en mouvement par un poids additionnel, l'action incessante de ce poids accélère constamment le mouvement. Mais si le corps qui descend, et sur lequel est posé le poids additionnel, vient à rencontrer le curseur à anneau, il continue son chemin en traversant l'anneau, tandis que le poids additionnel est arrêté, comme le montre la figure 111. Dès lors les deux corps se meuvent seulement en vertu de leur vitesse acquise ; leurs poids se faisant équilibre mutuellement, aucune force ne tend à modifier leur mouvement, qui, par conséquent, est uniforme.

L'uniformité du mouvement ainsi obtenu peut être vérifiée de la manière suivante. On prend les mêmes corps suspendus au fil, et le même poids additionnel que dans le paragraphe qui

précède ; on place le curseur à anneau de manière à arrêter le poids additionnel, lorsque le corps qui descend a parcouru une distance de 16 centimètres; et enfin, on dispose le curseur à disque de manière que sa face supérieure soit à 48 centimètres du zéro, ainsi que le montre la figure 115. En produisant le mouvement, par l'intermédiaire du mécanisme d'horlogerie, on voit qu'au bout d'une seconde le poids additionnel est arrêté, et qu'au bout de deux secondes le corps qui a continué à descendre vient choquer le disque. Si l'on recommence ensuite l'expérience, avec cette seule différence que le curseur à disque soit abaissé jusqu'à 80 centimètres du zéro, comme le montre la figure 116, on voit qu'il s'écoule encore une seconde, depuis le commencement du mouvement jusqu'à l'instant où l'anneau arrête le poids additionnel ; puis que le corps, qui continue à descendre, met deux secondes à aller de l'anneau au disque. Ceci montre que le corps qui descend, après avoir laissé le poids additionnel sur l'anneau, parcourt 32 centimètres en une seconde, et 64 en deux secondes : ce qui vérifie l'uniformité de son mouvement.

Pour trouver la vitesse que possède le corps qui descend sous l'action du poids additionnel, après une seconde, deux secondes, trois secondes de chute, il suffit donc de placer le curseur à anneau de telle manière qu'il arrête le poids additionnel après une seconde, deux secondes, trois secondes, à partir du commencement du mouvement ; puis de déterminer le chemin parcouru pendant une seconde, après que le mouvement a été ainsi rendu uniforme. L'expérience peut se faire de la manière suivante. On place d'abord l'anneau à 16 centimètres du zéro, et le disque à 48 centimètres (fig. 117) ; et l'on voit qu'au bout d'une seconde le poids additionnel est arrêté par l'anneau, et qu'au bout de deux secondes le corps vient choquer le disque : la vitesse acquise, après une seconde de chute, est donc de 32 centimètres par seconde. Puis on descend l'anneau à 64 centimètres du zéro, et le disque à 128 centimètres du même

Fig. 117. Fig. 118.

point (fig. 118); le mouvement étant produit, l'anneau arrête le poids additionnel au bout de deux secondes, et le corps choque le disque une seconde après, c'est-à-dire au bout de trois secondes : la vitesse acquise, après deux secondes de chute, est donc de 64 centimètres par seconde. Il résulte évidemment de là que *la vitesse acquise à un instant qaelconque, par un corps qui tombe librement sous l'action de la pesanteur, est proportionnelle au temps qui s'est écoulé depuis le commencement du mouvement.*

C'est cette proportionnalité entre les temps écoulés et les vitesses acquises à la fin de ces temps, qui a fait donner au mouvement d'un corps qui tombe, et à tout mouvement de même nature, le nom de *mouvement uniformément accéléré.*

Si nous observons, de plus, que le corps, après avoir parcouru avec le poids additionnel une distance de 16 centimètres dans la première seconde, possède à la fin de ce temps une vitesse de 32 centimètres par seconde, nous en conclurons cette autre loi : *La vitesse acquise par un corps qui tombe, après une seconde de chute, est double de l'espace qu'il a parcouru pendant cette seconde.*

§ 88. Les lois que nous venons de trouver, à l'aide de la machine d'Atwood, peuvent être représentées par des formules algébriques très-simples, qui sont d'un fréquent usage.

Désignons par la lettre g la vitesse acquise par un corps qui tombe librement sous l'action de la pesanteur, après la première seconde de sa chute. D'après ce que nous venons de voir, après deux secondes de chute, la vitesse acquise sera $2g$; après trois secondes de chute, elle sera $3g$;..... Donc, après t secondes de chute, elle sera gt, et si nous appelons v cette vitesse acquise, nous aurons la formule :

$$v = gt.$$

Le chemin parcouru pendant la première seconde de la chute étant la moitié de la vitesse acquise au bout de cette seconde, sera représenté par $\frac{1}{2}g$. En vertu de la première des lois que nous avons trouvées, le chemin parcouru pendant les deux premières secondes sera 4 fois $\frac{1}{2}g$; le chemin parcouru pendant les trois premières secondes sera 9 fois $\frac{1}{2}g$;.... Donc le chemin parcouru pendant les t premières secondes sera $\frac{1}{2}gt^2$, et si nous désignons ce chemin par h, nous aurons cette autre formule :

$$h = \frac{1}{2}gt^2.$$

Enfin, si nous observons que, de notre première formule, nous

déduisons $v^2 = g^2t^2$, et que la seconde nous donne $t^2 = \frac{2h}{g}$, nous en conclurons :

$$v^2 = 2gh, \quad \text{ou bien } v = \sqrt{2gh}.$$

Cette dernière formule servira à trouver la vitesse qu'acquerrait un corps en tombant d'une hauteur donnée. Elle nous sera utile lorsque nous nous occuperons du mouvement des liquides et des gaz.

§ 89. Pour qu'on puisse se servir des formules qui précèdent, il est nécessaire de connaître la valeur de la lettre g : on pourra la déterminer de la manière suivante. On laissera tomber une pierre, ou plutôt une balle de plomb, du haut d'une tour dont on connaîtra la hauteur, et l'on comptera, à l'aide d'une montre, le nombre de secondes que ce corps mettra à parcourir toute cette hauteur; on remplacera ensuite, dans la formule $h = \frac{1}{2} gt^2$, h par la hauteur de la tour exprimée en mètres, et t par le nombre de secondes qu'on aura obtenu, et l'on en déduira la valeur de g.

Ce moyen n'est pas très-exact, à cause de la rapidité de la chute du corps : aussi n'est-ce pas celui qu'on emploie réellement, et ne peut-il servir qu'à donner une idée grossière de la valeur de g. Nous verrons bientôt comment cette valeur se détermine avec une grande exactitude par les observations du pendule; mais nous adopterons immédiatement le résultat que ces observations fournissent, et nous admettrons qu'on a

$$g = 9^{m},8088.$$

En partant de cette valeur de g, et se servant de la formule $v = \sqrt{2gh}$, on peut calculer la vitesse que possède un corps qui est tombé d'une hauteur donnée, ou bien ce qu'on appelle simplement la *vitesse due à cette hauteur*. Le tableau suivant contient les résultats fournis par ce calcul, et correspondant à un grand nombre de valeurs de la hauteur de chute.

HAUTEUR DE CHUTE.	VITESSE ACQUISE.	HAUTEUR DE CHUTE.	VITESSE ACQUISE.
m.	m.	m.	m.
0,25	2,214	14	16,572
0,50	3,132	15	17,154
1	4,429	16	17,717
2	6,264	17	18,262
3	7,672	18	18,791
4	8,858	19	19,306
5	9,904	20	19,808
6	10,849	30	24,260
7	11,718	40	28,013
8	12,528	50	31,319
9	13,288	60	34,308
10	14,006	70	37,057
11	14,690	80	39,616
12	15,343	90	42,019
13	15,970	100	44,292

§ 90. Lorsqu'un corps pesant est lancé verticalement et de bas en haut, il monte jusqu'à une hauteur plus ou moins grande, suivant la grandeur de la vitesse d'impulsion qui lui a été imprimée. A mesure qu'il s'élève, sa vitesse va en diminuant; bientôt elle s'annule complétement, le corps s'arrête un moment, puis il redescend en parcourant le même chemin, avec des vitesses qui vont constamment en augmentant. A l'instant où, en descendant, il repasse par le point d'où il est parti, il a repris exactement la vitesse qui lui avait été donnée lorsqu'on l'avait lancé : c'est ce qu'on démontre à l'aide de l'expérience suivante.

Imaginons qu'on ait adapté à la règle de la machine d'Atwood deux curseurs à anneaux, tellement disposés que l'un de ces anneaux puisse être traversé par le corps suspendu à l'une des extrémités du fil, et que l'autre puisse l'être également par le corps suspendu à l'autre extrémité (fig. 119 et 120). Pour déterminer le mouvement de ces deux corps, on place un poids additionnel sur celui de droite, qui descend sous l'action de ce poids, (fig. 119); mais en même temps l'autre corps monte, et à l'instant où le premier, en traversant l'anneau de droite, abandonne son poids additionnel, le second en prend un exactement de même

poids, qui a été disposé d'avance sur l'anneau de gauche (fig. 120). Le mouvement continue en vertu de la vitesse acquise; tandis qu'il s'accélérait sous l'action du premier poids additionnel, il se ralentit de plus en plus sous l'action du second, qui se trouve dans les mêmes conditions qu'un corps pesant lancé de bas en haut. Les deux corps se meuvent donc toujours dans le même sens, jusqu'à ce que leur vitesse soit complétement détruite par la résistance que produit ce second poids additionnel. Alors, après un moment d'arrêt, ils reprennent un mouvement en sens contraire; le poids de gauche descend d'un mouvement accéléré, et abandonne bientôt son poids additionnel sur l'anneau qu'il traverse; le poids de droite reprend, en même temps, celui qu'il avait abandonné en descendant; le mouvement se ralentit de nouveau, s'arrête, puis recommence en sens contraire; et ainsi de suite.

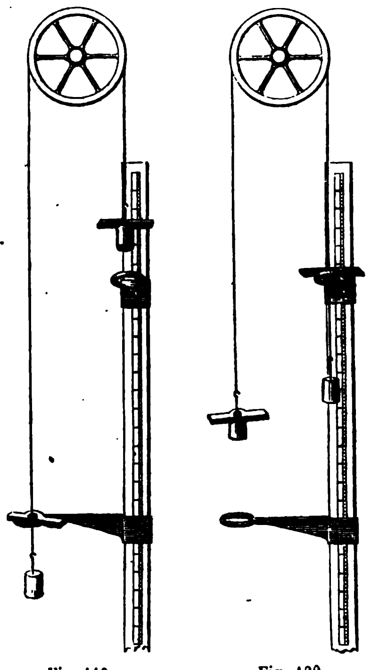


Fig. 119. Fig. 120.

Lorsque le poids additionnel de droite est abandonné, en descendant, sur l'anneau qui lui correspond, il possède une certaine vitesse qui a été produite par l'action de la pesanteur sur ce poids, depuis l'instant où il a commencé à descendre, et qui dépend de la hauteur de sa chute. Mais, en même temps, le corps de gauche, qui monte avec une vitesse égale, saisit l'autre poids additionnel, et lui communique instantanément la même vitesse; ce second poids additionnel se trouve donc lancé de bas en haut avec la vitesse que le premier avait acquise en tombant. Or, on observe que la hauteur à laquelle le second s'élève en vertu de sa vitesse d'impulsion est égale à celle dont le premier était tombé; en sorte que, lorsque ce second poids, qui se trouve

dans les mêmes conditions que l'autre, sera redescendu de cette hauteur, il aura acquis du haut en bas la vitesse avec laquelle il avait commencé à se mouvoir de bas en haut : c'est ce qui confirme bien la proposition énoncée il y a un instant.

Ainsi, le tableau contenu dans le § 89 peut donner une idée de la hauteur à laquelle s'élèvera un corps, d'après la vitesse d'impulsion qu'on lui aura transmise de bas en haut.

§ 91. **Appareil de M. Morin.** — On peut encore étudier les lois de la chute des corps au moyen de l'appareil suivant, dont M. Morin a indiqué la disposition.

Un cylindre vertical AA (fig. 121) est susceptible de tourner autour de son axe de figure. Un mécanisme d'horlogerie B, mû par un poids C, est destiné à lui communiquer un mouvement de rotation uniforme. Nous n'entrerons pas dans le détail des parties dont se compose ce mécanisme, et nous ne chercherons pas à faire comprendre comment il peut faire tourner uniformément le cylindre AA ; cela supposerait des connaissances que nous ne possédons pas encore. Mais nous nous contenterons de dire que, lorsqu'on laisse le cylindre AA libre de céder à l'action du poids C, son mouvement s'accélère peu à peu pendant quelque temps, puis devient très-sensiblement uniforme ; ce qu'on reconnaît sans peine, à l'aide du petit bruit que fait entendre une lame mince de baleine *a*, que viennent rencontrer successivement les quatre bras de la roue à ailettes adaptée au haut de l'appareil, et animée à chaque instant d'une vitesse proportionnelle à celle du cylindre AA.

En avant du cylindre AA se trouve suspendu un corps pesant D, muni d'un crayon dont la pointe appuie légèrement sur la surface du cylindre. Si l'on vient à décrocher ce corps, il tombe le long du cylindre ; deux fils métalliques tendus verticalement et passant dans des œillets adaptés au corps D, le guident dans cette chute, et empêchent qu'il ne s'écarte de la verticale par suite de l'action de quelque cause étrangère. Il suffit de tirer une petite ficelle *b*, pour décrocher le corps D, et déterminer ainsi sa chute.

Si le cylindre AA ne tournait pas, pendant que le corps D tombe, il est clair que la pointe du crayon qui lui est adapté tracerait sur le cylindre une simple ligne droite verticale. Lorsqu'au contraire le cylindre tourne et que le corps D reste immobile, la pointe du crayon trace sur la surface du cylindre une circonférence de cercle horizontale. Mais si l'on détermine la chute du corps D, pendant que le cylindre est animé du mouvement de rotation uniforme que lui a transmis le poids C, le crayon trace

sur la surface du cylindre une ligne essentiellement différente

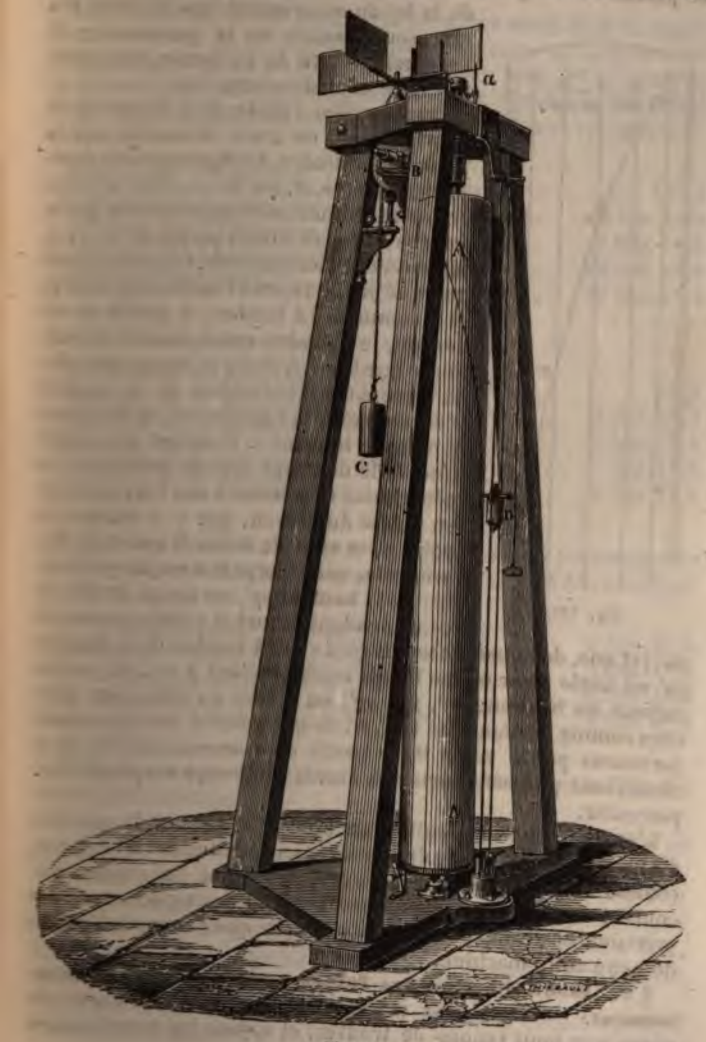


Fig. 121.

de la ligne droite et de la circonférence de cercle dont on vient de parler. Cette ligne courbe *mnpq* (fig. 122) dépend évidemment de la loi du mouvement que le corps D a pris sous l'action de la pesanteur ; et l'examen attentif de sa forme doit pouvoir faire connaître cette loi.

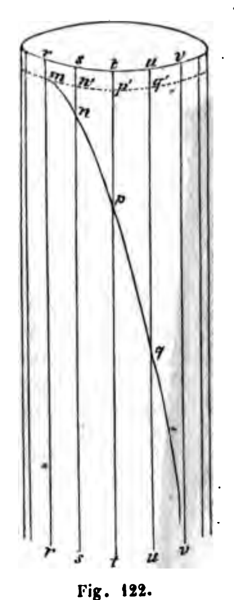


Fig. 122.

Pour faciliter l'étude de la forme de la courbe *mnpq*, on trace d'avance, sur la surface du cylindre, des lignes droites équidistantes *rr*, *ss*, *tt*, *uu*, *vv*...... Ces génératrices du cylindre sont rencontrées par la courbe *mnpq*, en divers points *m*, *n*, *p*, *q*, situées à diverses hauteurs. Le point *m* a été marqué par le crayon à l'instant où le corps D a commencé à tomber. A partir de cet instant, le cylindre ayant tourné de manière que la génératrice *ss* vienne prendre la place de la génératrice *rr*, le corps D s'est abaissé de la hauteur *nn'*, et le crayon a marqué le point *n*. Pendant un nouvel intervalle de temps égal au précédent, la génératrice *tt* est venue à son tour se placer en regard du crayon, qui y a marqué le point *p*, et ainsi de suite. Il est clair, d'après cela, que le corps D a employé à tomber de la hauteur *pp'*, un temps double de celui pendant lequel il s'était abaissé de *nn'* ; et que, de même, le temps qu'il a mis à tomber de la hauteur *qq'* est triple de ce même temps correspondant à *nn'*. Or, si l'on mesure les hauteurs *nn'*, *pp'*, *qq'*, on trouve qu'elles sont entre elles comme les nombres 1, 4, 9 : ce qui montre que les espaces parcourus par le corps D, à partir du commencement de sa chute, sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.

L'appareil dont il s'agit ne se prête pas, comme la machine d'Atwood, à la recherche directe de la loi des vitesses ; il ne donne, comme nous venons de l'expliquer, que la loi des espaces parcourus, mais il permet de vérifier cette loi des espaces avec une précision beaucoup plus grande que celle que comporte l'emploi de cette autre machine.

§ 92. **Mode d'action des forces pour produire le mouvement.** — Examinons maintenant les lois de la chute des corps que nous venons de trouver, et voyons les conséquences

qu'on peut en tirer, relativement à la manière dont la pesanteur produit le mouvement.

Le chemin parcouru pendant la première seconde de la chute, étant la moitié de la vitesse acquise par le corps au bout de cette seconde, sera égal à $4^m,9014$, ou, à très-peu près, $4^m,9$. La loi de la proportionnalité des chemins parcourus aux carrés des temps employés à les parcourir nous conduira donc aux résultats suivants :

pendant la 1re seconde, le corps parcourt. .	$4^m,9$
pendant les 2 premières secondes.	4 fois $4^m,9$
pendant les 3 premières secondes.	9 fois $4^m,9$
pendant les 4 premières secondes.	16 fois $4^m,9$
pendant les 5 premières secondes.	25 fois $4^m,9$
Etc.	

Nous conclurons de là que :

pendant la 1re seconde, le corps parcourt. .	$4^m,9$
pendant la 2e seconde	3 fois $4^m,9$
pendant la 3e seconde	5 fois $4^m,9$
pendant la 4e seconde	7 fois $4^m,9$
pendant la 5e seconde	9 fois $4^m,9$
Etc.	

Observons maintenant qu'en vertu de la loi de proportionnalité des temps écoulés aux vitesses acquises à la fin de ces temps, la vitesse acquise

au commencement de la 2e seconde est de. .	2 fois $4^m,9$
au commencement de la 3e seconde. . . .	4 fois $4^m,9$
au commencement de la 4e seconde. . . .	6 fois $4^m,9$
au commencement de la 5e seconde. . . .	8 fois $4^m,9$
Etc.	

En rapprochant ces différents résultats, nous pouvons faire les remarques suivantes :

1° Dans la première seconde, la pesanteur fait parcourir au corps $4^m,9$.

2° Dans la deuxième seconde, si la pesanteur cessait d'agir, il parcourrait 2 fois $4^m,9$, en vertu de sa vitesse acquise ; il parcourt en réalité 3 fois $4^m,9$: donc la pesanteur, en continuant à agir, lui fait parcourir, pendant la deuxième seconde, $4^m,9$ de plus qu'il ne parcourrait sans cela.

3° Dans la troisième seconde, si la pesanteur cessait d'agir, il parcourrait 4 fois $4^m,9$, en vertu de sa vitesse acquise ; mais il

parcourt en réalité 5 fois $4^m,9$; donc la pesanteur, en continuant à agir, lui fait encore parcourir pendant la troisième seconde, $4^m,9$ de plus qu'il n'aurait parcouru sans cela ; et ainsi de suite.

On peut donc dire, en général, que la pesanteur, en agissant sur un corps qui tombe, lui fait décrire, pendant chaque seconde, $4^m,9$ de plus que si le corps s'était mû, pendant toute cette seconde, seulement avec la vitesse qu'il avait acquise au commencement.

A la fin de chaque seconde, la vitesse acquise par le corps surpasse de 2 fois $4^m,9$ celle qu'il avait au commencement de cette seconde : on peut donc dire encore que pendant chaque seconde, quelle que soit la vitesse que possède déjà le corps, la pesanteur lui communique toujours le même accroissement de vitesse.

On doit conclure de tout cela que *dans le mouvement d'un corps qui tombe librement, la pesanteur agit toujours de la même manière, quelle que soit la vitesse dont le corps est animé.*

Une force, de quelque nature qu'elle soit, peut toujours être assimilée à la force qui provient de l'action de la pesanteur sur un corps : la loi que nous venons de trouver sera donc applicable à cette force sans aucune modification.

Il semble que, dans certaines circonstances, on observe des faits qui sont en opposition avec cette loi. Si, par exemple, un tonneau repose sur un sol uni et horizontal, et qu'on le fasse rouler en le poussant avec la main, on pourra lui communiquer un mouvement de plus en plus rapide. Mais on sent qu'au commencement du mouvement on a une plus grande action que plus tard : à mesure que le tonneau va plus vite, on accélère de moins ou moins sa vitesse, et il arrive un moment où l'on ne l'accélère même plus. Pour peu qu'on réfléchisse à ce qui se passe dans ce cas, on reconnaîtra qu'il y a une différence essentielle avec ce qui se produit dans le mouvement d'un corps qui tombe librement. On verra, en effet, que plus le tonneau va vite, plus la pression qu'on peut exercer avec les mains diminue ; et que, s'il a atteint la plus grande vitesse que puisse prendre un homme en courant, il ne sera plus possible de continuer à le pousser pour augmenter encore sa vitesse. L'augmentation de la vitesse du tonneau donne lieu à une diminution dans la grandeur de la force qui agit sur lui, et c'est pour cela que, plus la vitesse est grande, moins on peut l'accélérer : mais si la force de pression exercée par les mains était toujours la même, elle donnerait lieu toujours au même accroissement de vitesse dans une seconde de

temps. Le tonneau, en roulant de plus en plus vite, se soustrait de plus en plus à l'action des mains qui le poussent ; tandis que, quelle que soit la vitesse d'un corps qui tombe, il ne se soustrait aucunement à l'action de la pesanteur.

§ 93. *Les vitesses communiquées à un même corps, par deux forces qui agissent sur ce corps exactement dans les mêmes circonstances sont proportionnelles aux grandeurs de ces forces.* Cette proposition peut se vérifier de la manière suivante, à l'aide de la machine d'Atwood.

On suspendra d'abord, aux deux extrémités du fil, deux corps pesant chacun 240 grammes, et l'on posera un poids additionnel de 20 grammes sur celui des deux corps qui se meut le long de la règle divisée (fig. 123). Ce poids additionnel déterminera le mouvement des deux corps, et l'on pourra, en opérant comme précédemment, déterminer la vitesse acquise par ces corps, après une seconde de mouvement.

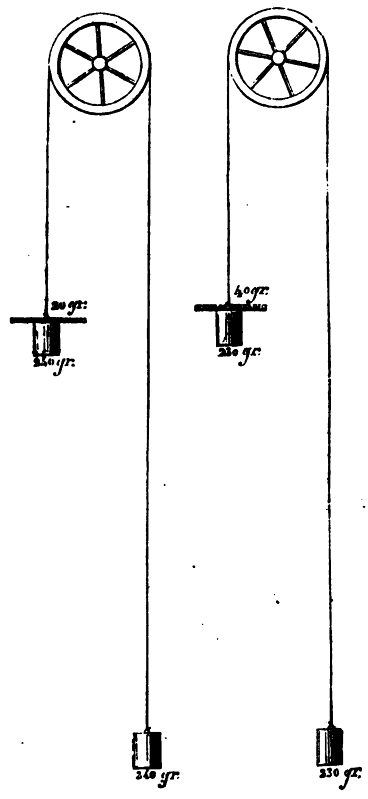


Fig. 123. Fig. 124.

On remplacera ensuite les deux corps de 240 grammes par deux corps pesant chacun 230 grammes, et le poids additionnel de 20 grammes par un autre de 40 grammes (fig. 124) ; puis on déterminera encore la vitesse acquise par les corps, sous l'action de ce poids additionnel, après une seconde de mouvement.

On voit que, dans chacun des deux cas, l'ensemble des corps qui se meuvent pèse 500 grammes ; on peut donc dire que c'est

le même corps qui est mis en mouvement, dans le premier cas, par une force de 20 grammes, et, dans le second, par une force de 40 grammes. Eh bien ! l'expérience montre que la vitesse acquise, après une seconde de mouvement, est deux fois plus grande dans le second cas que dans le premier. Si l'on faisait une troisième expérience, en faisant mouvoir des corps pesant ensemble 500 grammes, par un poids additionnel de 60 grammes, on trouverait de même que la vitesse acquise, après une seconde de mouvement, serait triple de ce qu'elle était dans le premier cas. La proportionnalité des forces aux vitesses qu'elles communiquent à un même corps, sur lequel elles agissent dans les mêmes circonstances, se trouve par là complétement vérifiée.

§ 94. Cette loi permet d'obtenir très-facilement la vitesse qu'une force donnée communiquera à un corps, en agissant sur lui d'une manière régulière pendant un temps déterminé ; ou bien, réciproquement, la grandeur de la force capable de communiquer à un corps une vitesse donnée, en agissant sur lui d'une manière régulière pendant un certain temps. Les deux exemples suivants suffiront pour montrer ce qu'on doit faire dans toutes les questions de ce genre.

Première question. — Quelle vitesse une force de 25^k donnera-t-elle à un corps pesant 140^k, en agissant sur lui pendant une seconde, suivant une même direction ? — Si la force était de 140^k, la vitesse communiquée au corps, après une seconde d'action, serait de 9,8088 par seconde ; la force étant de 25^k seulement, la vitesse qu'elle donnera au corps sera fournie par la proportion

$$\frac{x}{9^m,8088} = \frac{25}{140}, \qquad x = \frac{9^m,8088 \times 25}{140} = 1^m,752.$$

Deuxième question. — Quelle force devra-t-on appliquer à un corps pesant 140^k, pour qu'en agissant sur ce corps pendant une seconde, dans une même direction, elle lui communique une vitesse de 2^m par seconde ? — Si la vitesse devait être de $9^m,8088$ par seconde, la force serait égale au poids même du corps, c'est-à-dire qu'elle serait de 140^k ; la vitesse devant être de 2^m seulement par seconde, la grandeur de la force s'obtiendra à l'aide de la proportion suivante :

$$\frac{x}{140^k} = \frac{2}{9,8088}, \qquad x = \frac{140^k \times 2}{9,8088} = 28^k,546.$$

§ 95. **Masse d'un corps, quantité de mouvement.** — En résolvant la seconde des deux questions qui précèdent,

nous avons trouvé que la force capable de communiquer une vitesse de 2 mètres par seconde, à un corps pesant 140ᵏ, en agissant sur lui dans une même direction pendant une seconde, était égale à $\frac{140^k \times 2}{9,8088}$; ou bien, ce qui revient au même, égale à $\frac{140^k}{9,8088} \times 2$. Cette force s'obtient donc en divisant le poids du corps par 9,8088, c'est-à-dire par le nombre que nous avons désigné précédemment par g, et multipliant le quotient par le nombre qui représente la vitesse à communiquer au corps. Ce quotient du poids d'un corps par le nombre g est ce qu'on nomme sa *masse* ; en sorte qu'on peut dire que la force capable de donner une certaine vitesse à un corps, en agissant sur lui pendant une seconde, est égale au produit de la masse du corps par la vitesse qui doit lui être communiquée.

Il résulte évidemment de là, que, plus la masse d'un corps est grande, plus la force qui doit lui communiquer une vitesse donnée est grande ; et aussi que, plus la masse d'un corps est grande, plus la vitesse que lui communiquera une force donnée sera petite. On voit donc que la signification du mot masse, en mécanique, est bien la même que celle qu'on lui attribue habituellement : on dit, en effet, qu'un corps est plus ou moins massif, que sa masse est plus ou moins grande, suivant qu'on éprouve plus ou moins de difficulté à le soulever, à le déplacer. L'acception vulgaire du mot masse se trouve conservée dans la définition que nous en avons donnée ; mais ce qu'il y avait de vague dans cette acception a disparu, et le mot masse nous représentera désormais quelque chose qui peut se mesurer, qui peut s'évaluer en nombre.

On emploie souvent en mécanique l'expression de *quantité de mouvement* : nous sommes en mesure, dès maintenant, de donner une définition précise de cette expression. On appelle quantité de mouvement d'un corps, le produit qu'on obtient en multipliant sa masse par sa vitesse. C'est ainsi qu'on pourra dire, en raison de ce qui a été trouvé au commencement de ce paragraphe, qu'une force est égale à la quantité de mouvement qu'elle communique à un corps, en agissant sur lui, dans une même direction, pendant une seconde.

§ 96. **Mouvement d'un corps pesant sur un plan incliné.** — Lorsqu'un corps, soumis à la seule action de la pesanteur, se trouve sur un plan incliné, il descend le long de ce plan. Son poids se décompose, ainsi que nous l'avons vu au § 63, en une composante perpendiculaire au plan, qui ne produit pas d'effet, et une autre composante parallèle au plan, qui produit

seule le mouvement : le rapport de cette dernière composante au poids du corps est le même que le rapport de la hauteur du plan incliné à sa longueur. Cette composante, agissant toujours de la même manière, et dans la même direction, donne au corps un mouvement uniformément accéléré, mais plus lent que celui qu'il prendrait s'il pouvait tomber librement sous l'action de son poids tout entier. Le mouvement ainsi produit présente une certaine circonstance très-remarquable : c'est que, quelle que soit l'inclinaison du plan, lorsque le corps, en descendant le long de ce plan, s'est abaissé d'une certaine hauteur mesurée verticalement, il est animé de la même vitesse que s'il était tombé librement de la même hauteur suivant la verticale. Voici comment on peut s'en rendre compte.

Fig. 125.

Supposons que la hauteur AC du plan incliné soit le tiers de sa longueur AB (fig. 125): la composante du poids du corps, qui est parallèle au plan, et qui détermine seule le mouvement, sera trois fois plus petite que ce poids. La vitesse que le corps aura acquise au bout d'une seconde sera donc (§ 93) trois fois plus petite que si le corps était tombé librement suivant la verticale ; et, de même, l'espace qu'il parcourra pendant la première seconde de son mouvement sera trois fois plus petit que l'espace qu'il aurait parcouru dans le même temps, en tombant verticalement. On voit, par là, que si l'on prend AF égal à $4^m,9044$, et AD trois fois plus petit (ce qui pourra se faire en abaissant FD perpendiculaire à AB), le corps, parti du point A, viendra au point D au bout d'une seconde ; tandis que s'il était tombé suivant la verticale, il se serait trouvé au même instant au point F.

Menons la ligne horizontale DE : le rapport de AE à AD sera le même que celui de AC à AB, c'est-à-dire de 1 à 3. AE est donc égal au tiers de AD ; mais AD est déjà le tiers de AF : donc AE sera le neuvième de AF. La loi de la proportionnalité des espaces parcourus aux carrés des temps employés à les parcourir, nous montre que le corps, en tombant verticalement à partir du point A, serait arrivé en E au bout d'un tiers de seconde, puisqu'il

arrivait en F au bout d'une seconde. La vitesse qu'il possédera en passant au point E sera donc trois fois plus petite que celle qu'il acquerra en arrivant au point F; mais déjà nous avons dit que, dans le mouvement sur le plan incliné, la vitesse du corps au point D, après une seconde de mouvement, sera trois fois plus petite que la vitesse qu'il aurait au point F, après une seconde de chute verticale : donc les vitesses du corps, au point D, dans son mouvement sur le plan incliné, et au point E, dans le mouvement qu'il prendrait en tombant librement suivant la verticale, sont exactement les mêmes.

Ce que nous venons de dire pour la vitesse acquise par le corps, à la fin de la première seconde, dans son mouvement sur le plan incliné, nous pourrions évidemment le répéter pour la vitesse qu'il acquerrait à tout autre instant. Il en résulte que, si deux corps partent du même point A (fig. 126) et se meuvent, sous la seule action de leur poids, l'un sur le plan incliné AB, l'autre suivant la verticale AC, les vitesses que le premier corps possédera, lorsqu'il passera aux points D, D′, D″, seront respectivement égales à celles qu'aura le second corps, lorsqu'il passera aux points E, E′, E″, situés sur les mêmes plans horizontaux que les premiers. En sorte qu'on peut conclure généralement de ce qui précède, que la vitesse acquise, à un instant quelconque, par un corps qui descend le long d'un plan incliné, sous la seule action de son poids, n'est autre chose que la vitesse due à la hauteur dont il s'est abaissé verticalement depuis son point de départ (§ 89).



Fig. 126.

Si un corps pesant était lancé le long d'un plan incliné AB (fig. 127), et de bas en haut, comme l'indique la flèche, sa vitesse serait retardée par l'action de son poids, dont une composante tendrait à l'empêcher de monter. La diminution de vitesse qu'il éprouverait, en montant de D en D′, serait précisément égale à l'augmentation de vitesse qui lui serait donnée, s'il parcourait le même chemin en sens contraire. Il en résulte que, si



Fig. 127.

en D il était animé de la vitesse due à la hauteur CD, en D′ il n'aurait plus que la vitesse due à la hauteur C′D′, les points C et C′ étant situés sur une même ligne horizontale.

§97. **Mouvement d'un corps pesant sur une ligne courbe.** — Lorsqu'un corps pesant se meut le long d'une ligne courbe, il acquiert, en descendant, successivement différentes vitesses; nous déterminerons aisément ces vitesses, à l'aide de ce que nous venons de voir. Pour cela nous diviserons d'abord la ligne courbe en plusieurs parties AB, BC, CD... (fig. 128), assez petites pour que chacune d'elles puisse être regardée comme une petite ligne droite, et assimilée en conséquence à un plan incliné, sur lequel le corps est obligé de se mouvoir. Si le corps part du point A, il descendra jusqu'en B, et, arrivé en ce point, il sera animé de la vitesse due à la hauteur BM. Il prendra alors la direction BC, et se trouvera dans les mêmes conditions que s'il se mouvait sur le plan incliné RBC, et qu'il fût parti du point R : lorsqu'il arrivera au point C, il sera donc animé de la vitesse due à la hauteur CN. En continuant ainsi à suivre le mouvement du corps sur les diverses parties dans lesquelles nous avons décomposé la courbe, nous trouverons toujours qu'en un point quelconque, il est animé de la vitesse due à la hauteur verticale du point de départ A au-dessus de ce point.



Fig. 128.

Il nous sera facile, d'après cela, de nous rendre compte des diverses circonstances que présentera le mouvement d'un corps pesant sur une ligne courbe, en raison de la forme de cette ligne. Si le corps se meut sur la ligne ABC (fig. 129) et part du point A, il descendra en prenant une vitesse de plus en plus grande, jusqu'à ce qu'il arrive au point le plus bas B ; en ce point, il aura la vitesse due à la hauteur de l'horizontale AC, au-dessus du point B. En vertu de ...e acquise, il remontera vers le point C ; mais, la pesan-



Fig. 129.

teur tendra constamment à ralentir son mouvement, sa vitesse diminuera, de telle sorte que, quand il arrivera en un point E, il n'aura plus que la vitesse qu'il avait précédemment en passant au point D, situé au même niveau. Tant qu'il ne sera pas arrivé en C, au niveau du point A, il conservera encore une vitesse ascendante; mais, dès qu'il aura atteint ce point C, sa vitesse sera nulle, la pesanteur le fera redescendre jusqu'au point B, qu'il dépassera en vertu de sa vitesse acquise; il remontera vers le point A, puis redescendra de nouveau en sens contraire, et ainsi de suite indéfiniment. Si le corps devait se mouvoir sur la ligne ABCD (fig. 130), et qu'il partît du point A, il descendrait jusqu'en



Fig. 130.

B, remonterait en C, dépasserait ce point pour redescendre en D, puis remonterait jusqu'au point E, situé au niveau du point A. Sa vitesse étant devenue nulle en ce point E, l'action incessante de la pesanteur le ferait descendre en sens contraire, et il parcourrait ainsi le chemin EDCBA, pour s'arrêter un instant en A, d'où il repartirait pour revenir en E, et ainsi de suite. Dans un pareil mouvement, la vitesse du corps redeviendra la même, chaque fois qu'il se retrouvera sur un même plan horizontal : ainsi les vitesses qu'il possédera aux quatre points MNPQ seront égales entre elles.



Fig. 131.

§ 98. **Pendule.** — Un corps pesant, de petites dimensions, A (fig. 131), tel qu'une balle de plomb, suspendu à l'extrémité inférieure d'un fil très-délié, dont l'extrémité supérieure B est fixe, constitue un *pendule*. Le corps A sera en équilibre lorsque le fil sera vertical, parce qu'alors son poids sera contre-balancé par la tension du fil; dans ce cas, ce ne sera autre chose que le *fil à plomb*, dont on se sert pour reconnaître la verticalité d'une ligne ou d'une surface plane. Mais, si l'on dérange ce

corps A, et qu'on le place dans la position indiquée par la figure 132, l'équilibre sera rompu ; le poids du corps se décomposera en deux forces, dont l'une, dirigée suivant le prolongement du fil, sera détruite, tandis que l'autre, dirigée perpendiculairement au fil, tendra à ramener le corps vers la position où il était en équilibre. Le corps A ainsi mis en mouvement, restera nécessairement sur le cercle dont le centre est en B, et dont le rayon est BA : il se mouvra donc conformément à ce que nous avons trouvé dans le § 97. Ce corps descendra vers le point C, avec une vitesse de plus en plus grande ; arrivé en ce point, il sera animé de la vitesse due à la hauteur verticale DC ; il remontera, en vertu de sa vitesse acquise, jusqu'au point A′, situé au niveau du point A ; puis il redescendra pour revenir au point A, et ainsi de suite. Le pendule fera ainsi une série d'oscillations entre les positions extrêmes BA et BA′, et si aucune cause extérieure ne venait altérer ce mouvement, il s'entretiendrait indéfiniment. Quand on fait l'expérience, ces oscillations successives se produisent bien : mais on remarque bientôt que l'angle ABA′, formé par les positions extrêmes du pendule, angle qu'on nomme l'*amplitude* des oscillations, va en diminuant progressivement, et qu'au bout d'un certain temps cet angle devient nul ; en sorte que le pendule revient à l'état d'équilibre. Cette diminution progressive de l'amplitude des oscillations tient à la résistance que l'air oppose au mouvement du pendule, et aussi aux résistances qui se produisent toujours à son point de suspension, de quelque manière qu'on effectue cette suspension.



Fig. 132.

§ 99. Le temps que le pendule emploie à aller de la position BA à la position opposée BA′, est ce que l'on nomme la durée d'une oscillation. Ce temps varie, lorsque l'amplitude change ; mais si l'amplitude est petite, les changements qu'elle éprouve n'influent pas d'une manière sensible sur la durée des oscillations. Désignons par l la longueur du pendule exprimée en mètres ; par π le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre, rapport qui est à peu près égal à $3\frac{1}{7}$, ou plus exactement $\frac{355}{113}$; par g le nombre 9,8088, comme précédemment, et

par t la durée d'une petite oscillation exprimée en secondes. La mécanique rationnelle apprend que cette durée d'une petite oscillation est donnée par la formule

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Cette formule montre que, si la longueur du pendule varie, la durée des oscillations varie comme la racine carrée de cette longueur ; en sorte que, pour avoir des pendules dont les durées d'oscillations soient entre elles comme les nombres 1, 2, 3, il faut leur donner des longueurs proportionnelles aux nombres 1, 4, 9. On peut vérifier cette loi expérimentalement de la manière suivante. On prend deux pendules, dont l'un est 4 fois plus long que l'autre, et on les suspend l'un devant l'autre, en deux points situés sur une même ligne horizontale. Si l'on écarte ces deux pendules de leur position d'équilibre, d'un même côté, et d'une même quantité, comme le montre la figure 133, puis qu'on les abandonne en même temps à eux-mêmes, ils prendront successivement les positions relatives représentées par les figures 134, 135, 136. Après une



Fig. 133. Fig. 134. Fig. 135. Fig. 136.

oscillation entière du petit pendule, le grand n'aura fait qu'une demi-oscillation (fig. 134) ; pendant que celui-ci achèvera son oscillation, l'autre reviendra au point de départ (fig. 135). Lorsque le plus grand des deux aura fait ensuite une demi-oscillation en sens contraire, le petit achèvera une troisième oscillation, (fig. 136) ; et enfin lorsque le grand pendule sera revenu à sa première position, le petit y sera également revenu, en sorte qu'ils se retrouveront comme au commencement du mouvement (fig. 133). On voit par là que, pendant que le grand pendule fait une oscillation, le petit en fait deux.

§ 100. La formule qui donne la durée des petites oscillations d'un pendule s'établit, en mécanique rationnelle, en supposant que le fil n'est pas pesant, et que le corps suspendu à son extrémité se réduit à un point matériel; ce pendule idéal est ce que l'on nomme un *pendule simple*. La lettre l, employée dans la formule, désigne la longueur du fil, comptée depuis son point d'attache jusqu'au point matériel qui le termine.

Lorsqu'un pendule est formé d'un fil matériel à l'extrémité duquel est attaché un corps pesant, quelque délié que soit le fil, quelque petit que soit le corps, ce n'est plus un pendule simple. Les pendules qui servent à régulariser le mouvement des horloges, et qui se composent d'une tige métallique terminée par un corps lenticulaire, sont encore plus loin du pendule idéal dont nous venons de parler. De pareils pendules sont désignés, par opposition, sous le nom de *pendules composés*.

Dans les oscillations d'un pendule composé, toutes les molécules dont il est formé oscillent de la même manière; la durée de l'oscillation de chacune d'elles est la même que celle de toutes les autres. Cependant, si ces molécules étaient liées isolément au point de suspension par des fils flexibles non pesants, et que chacune pût osciller indépendamment des autres, elles formeraient autant de pendules simples de diverses longueurs, et leurs oscillations n'auraient pas la même durée: celles qui seraient plus rapprochées du point de suspension iraient plus vite, les autres iraient plus lentement. On voit donc que, lorsque toutes les molécules sont liées entre elles, et constituent ainsi le pendule composé, pour qu'elles oscillent toutes de même, il faut que le mouvement des unes soit ralenti, et celui des autres accéléré par leur dépendance mutuelle. Entre les premières et les dernières, il doit y avoir certaines molécules dont le mouvement n'est ni ralenti, ni accéléré, et qui oscillent de la même manière que si elles étaient seules. La distance d'une quelconque de ces molécules au point de suspension est ce que l'on nomme la *longueur du pendule*; c'est la longueur du pendule simple équivalant au pendule composé, relativement à la durée des oscillations.

La mécanique rationnelle enseigne à trouver cette longueur, quelle que soit la figure du pendule composé, et de quelque matière que ses diverses parties soient formées. Dans le cas où le pendule est formé d'une balle de plomb suspendue à l'extrémité d'un fil délié, la longueur du pendule simple qui lui est équivalent ne diffère que d'une quantité insignifiante de la distance du point de suspension au centre de la balle; c'est donc cette distance

qu'on devra prendre pour la longueur du pendule, lorsqu'on voudra se servir de la formule qui donne la durée d'une petite oscillation.

§ 101. Si l'on cherche, par l'expérience, la durée d'une oscillation d'un pendule, en comptant, par exemple, le nombre d'oscillations qu'il effectue en une minute ou 60 secondes, et divisant 60 par ce nombre d'oscillations; et si, en outre, on détermine la longueur du pendule simple équivalent, on pourra, à l'aide de ces données, trouver très-exactement la valeur du nombre que nous avons désigné par g. En effet, si l'on prend la formule écrite précédemment au § 99, qu'on élève au carré les deux membres de l'égalité, et qu'on résolve ensuite par rapport à g, on trouvera

$$g = \frac{\pi^2 l}{t^2},$$

ce qui permettra de calculer la valeur de g, puisqu'on connaît les valeurs de π, de l et de t. C'est ainsi qu'on a trouvé que g est égal à 9^m,8088, comme nous l'avons énoncé au § 89.

La même formule peut encore se mettre sous cette autre forme :

$$l = \frac{g t^2}{\pi^2}.$$

On pourra s'en servir pour trouver la longueur d'un pendule dont les oscillations aient une durée connue. Si l'on veut connaître, par exemple, la longueur du pendule à secondes, c'est-à-dire du pendule dont chaque oscillation a une durée d'une seconde, on remplacera t par 1, g par 9,8088, π par $\frac{355}{113}$, et l'on trouvera 0^m,994 pour cette longueur.

Cette longueur du pendule à secondes doit rester gravée dans la mémoire, afin qu'on puisse s'en servir au besoin. Il est, en effet, très-facile de construire un pareil pendule, partout où l'on se trouve, en attachant une balle de plomb ou une bille à l'extrémité d'un fil délié, et suspendant ce fil de manière que la distance du point de suspension au centre de la balle ou de la bille soit de 0^m,994. A l'aide de ce pendule, qu'on fera osciller, on pourra mesurer très-exactement la durée d'un phénomène, lorsque cette durée ne sera pas très-longue. On pourra s'en servir, par exemple, pour compter le nombre de secondes qu'une pierre emploie à tomber de l'orifice d'un puits jusqu'à son fond, afin d'en déduire la profondeur du puits. Si l'on voulait un pendule qui fît chaque oscillation en une demi-seconde, il faudrait lui donner une longueur quatre fois plus petite, c'est-à-dire de 0^m,248.

§ 102. **Mouvement de l'escarpolette.** — L'escarpolette consiste en un siége suspendu à des cordes, sur lequel on se place pour se balancer dans l'air. Les cordes, au nombre de deux ou de quatre, sont attachées en deux points fixes, situés sur une même ligne horizontale. Quand l'escarpolette est mise en mouvement, elle tourne autour de cette ligne horizontale, comme autour d'un axe, et constitue ainsi un véritable pendule. Si l'on n'entretient pas le mouvement, les oscillations successives ont des amplitudes de plus en plus petites, et elles finissent, au bout de quelque temps, par disparaître tout à fait, ainsi que nous l'avons dit dans le § 98.

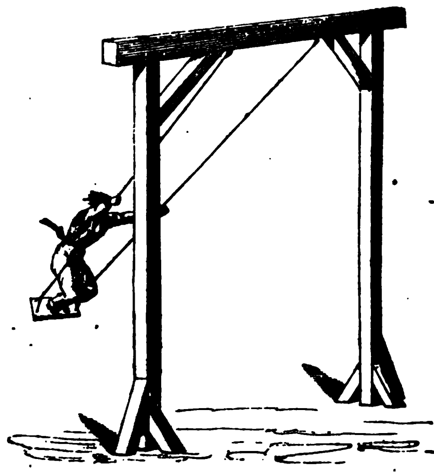
Il arrive cependant que, lorsqu'une personne, placée debout sur l'escarpolette, imprime certains mouvements à son corps, l'amplitude des oscillations va en augmentant, et que, tout en ayant été très-faible d'abord, cette amplitude peut devenir très-grande : c'est l'explication de ce fait que nous allons donner.

Imaginons qu'un pendule AB (fig. 137), formé d'un petit corps A, et d'un fil très-délié, puisse être disposé de telle manière, que, lorsqu'il descend vers la verticale BC, il conserve toujours la même longueur AB ; tandis que, dès qu'il l'aura dépassée, et qu'il remontera de l'autre côté, sa longueur devienne brusquement plus petite, et se réduise à BD. Pendant une oscillation entière, le corps A décrira d'abord l'arc de cercle AC, en descendant ; arrivé en C, il remontera brusquement au point D ; enfin il achèvera l'oscillation en se mouvant sur l'arc de cercle DN.

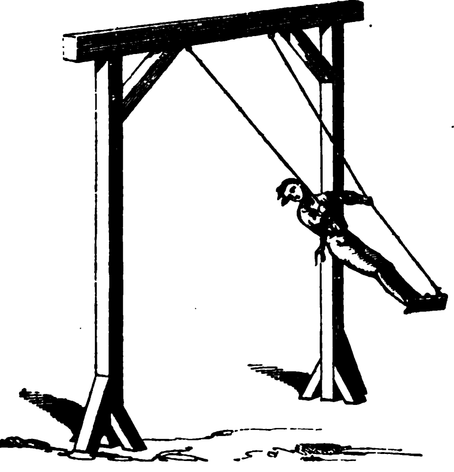
Fig. 137.

Il est facile de reconnaître que, dans ce cas, la demi-oscillation ascendante devra avoir une amplitude plus grande que la demi-oscillation descendante qui la précède. Le corps A, au moment où il arrive en C, est animé de la vitesse due à la hauteur CF, vitesse qui est dirigée horizontalement ; en se transportant brusquement de C en D, il conserve la même vitesse horizontale, et c'est en vertu de cette vitesse qu'il monte le long du cercle DN ; il devra donc s'élever sur ce cercle jusqu'en un point H, dont la hauteur DK, au-dessus du point D, soit égale à CF ; en sorte que, à la fin de la demi-oscillation ascendante, le pendule prendra la direction BH. Or, il est aisé de voir que l'angle CBH est plus grand que l'angle ABC. Si, par exemple, BD était la moitié de BC,

il faudrait prendre DG égal à la moitié de CF, pour que le point E, situé au niveau du point G, déterminât un angle CBE égal à ABC; et puisque DK est égal à CF, il s'ensuit que le point H est plus haut que le point E, et, en conséquence, que l'angle CBH est plus grand que l'angle ABC.


Fig. 138.

Admettons encore que le pendule, en partant de la direction BH, pour recommencer une autre oscillation, reprenne sa longueur primitive AB; puis, qu'il se raccourcisse de nouveau, aussitôt qu'il aura achevé sa demi-oscillation descendante; la même raison fera que l'amplitude de la demi-oscillation ascendante sera plus grande que l'angle CBH. Et si le pendule continue à se mouvoir ainsi, en s'allongeant lorsqu'il se rapproche de la verticale, et se raccourcissant lorsqu'il s'en éloigne, l'amplitude des oscillations ira toujours en augmentant.


Fig. 139.

Les circonstances dans lesquelles nous venons de faire mouvoir un pendule se réalisent à peu près dans le mouvement particulier de l'escarpolette dont nous voulons nous rendre compte. L'homme qui se tient debout pour se balancer, et qui cherche à augmenter l'amplitude des oscillations par les mouvements de son corps, se baisse et se relève alternativement. Il se baisse et prend la position indiquée par la figure 138, au moment de chaque demi-oscillation descendante ; il se relève, au contraire, à chaque demi-oscillation ascendante, et prend la position représentée par la figure 139. Dans le premier cas, une portion de son corps s'éloigne des points d'attache de l'escarpolette; dans le second cas, elle s'en rapproche. Il existe évidemment une grande analogie avec ce que nous avions supposé dans notre pendule, et le résultat doit être le même, c'est-à-dire que l'amplitude des oscillations doit aller constamment en augmentant.

§ 103. **Mouvement curviligne d'un corps entièrement libre.** — Lorsqu'un corps a été lancé dans l'espace avec une certaine vitesse, si aucune force ne venait agir sur lui pour modifier son mouvement, il se mouvrait uniformément et en ligne droite. Mais, dès le moment que ce corps sera soumis à l'action continue d'une force, son mouvement ne restera pas à la fois rectiligne et uniforme.

Si la force agit constamment suivant la direction du mouvement primitif du corps, elle ne changera pas la direction du mouvement et ne fera que modifier la vitesse, en l'augmentant ou la diminuant, suivant qu'elle agira dans le sens du mouvement ou en sens contraire : le mouvement restera rectiligne, mais il ne sera plus uniforme. Ce cas se présente, par exemple, lorsqu'un corps pesant se meut suivant une ligne verticale, soit qu'on l'ait laissé tomber sans lui imprimer de vitesse, soit qu'on l'ait lancé de bas en haut.

Mais lorsque la force appliquée au corps n'agira pas suivant la direction de son mouvement, elle tendra à le détourner de sa route : elle l'en déviera en effet, à chaque instant, de plus en plus, et lui fera décrire une ligne courbe : le mouvement deviendra curviligne. On en a un exemple dans le mouvement d'un corps pesant lancé suivant une direction oblique : on voit ce corps monter, puis descendre, en décrivant une ligne courbe, parce que l'action de la pesanteur change à chaque instant la direction du mouvement que possède le corps. Nous reviendrons dans un instant sur cet exemple du mouvement curviligne.

Nous ne pourrons nous rendre complétement compte de la manière dont le mouvement d'un corps est rendu curviligne,

par l'action incessante d'une force non dirigée suivant le mouvement, que lorsque nous saurons composer entre elles deux vitesses dont un corps se trouve animé simultanément. C'est ce dont nous allons nous occuper d'abord.

§ 101. **Composition des vitesses.** — Il peut paraître difficile, au premier abord, de concevoir qu'un corps soit animé, à la fois, de deux vitesses : l'exemple suivant lèvera toute incertitude à cet égard. Imaginons qu'un bateau se meuve uniformément, et en ligne droite, le long d'une rivière; une bille posée sur le pont, en un point A (fig. 140), participe au mouvement du ba-

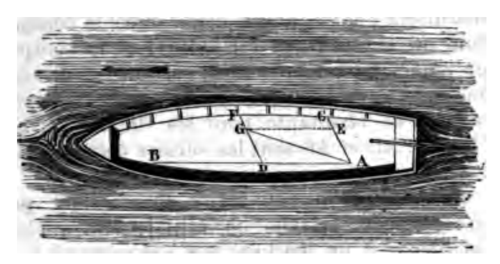


Fig. 140.

teau, et sans se déplacer sur le pont, elle se meut uniformément suivant la ligne droite AB. Si l'on vient à lancer cette bille de manière à la faire rouler uniformément sur le pont, suivant la ligne AC, elle se trouvera animée de deux mouvements à la fois : 1° du mouvement du bateau; 2° de son mouvement par rapport au bateau.

Soit AD le chemin que la bille parcourrait en une seconde, en vertu du premier mouvement seul, c'est-à-dire la vitesse de ce premier mouvement, vitesse qui est la même que celle du bateau; soit de plus AE la vitesse de la bille, dans son mouvement de roulement sur le pont. Au bout d'une seconde, le bateau se sera avancé d'une quantité égale à AD; la ligne AC, sur laquelle la bille roule, et qu'on peut supposer tracée sur le pont, se sera transportée parallèlement à elle-même dans la position DF. Mais, en même temps, la bille aura marché sur cette ligne d'une quantité égale à AE, et, comme le point E se sera transporté en G, en décrivant EG parallèle à AD, la bille se trouvera en G, à la fin de la seconde que nous considérons.

La bille était au point A au commencement de cette seconde, et elle est au point G à la fin : or, il est aisé de voir que, pendant toute la durée de cette seconde, elle n'a pas cessé de se trouver

sur la ligne AG, et qu'elle l'a parcourue d'un mouvement uniforme. Si l'on cherchait, en effet, par le raisonnement qu'on vient de faire, où était la bille après une demi-seconde, un quart de seconde, on trouverait qu'elle était située sur la ligne AG, à la moitié, au quart de cette ligne, à partir du point A. Donc, en définitive, la bille, animée simultanément d'une vitesse AD, et d'une autre vitesse AE, dont les directions sont différentes, se trouve avoir une vitesse unique, représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les vitesses AD et AE.

On remarquera l'analogie qui existe entre la composition des vitesses dont un même corps est animé, et la composition des forces appliquées à un même point suivant des directions différentes. En raison de cette analogie, on emploie les expressions de composantes et de résultante pour les vitesses, aussi bien que pour les forces : AD et AE sont les vitesses composantes ; AG est la vitesse résultante.

§ 105. **Mouvement parabolique d'un corps pesant.** — Lorsqu'un corps pesant est lancé horizontalement, quelque grande que soit sa vitesse, il ne continue pas à se mouvoir suivant une ligne horizontale : la pesanteur l'abaisse de plus en plus au-dessous de cette ligne, et lui donne ainsi un mouvement curviligne. Pour étudier plus facilement la manière dont se produit le changement continuel de direction du mouvement, nous imaginerons que la pesanteur, au lieu d'agir sans interruption, n'exerce son action sur le corps que d'une manière intermittente : nous supposerons, par exemple, que la durée totale du mouvement étant divisée en quarts de seconde, la pesanteur agisse brusquement au commencement de chacun de ces petits intervalles de temps, puis qu'elle cesse d'agir, pour recommencer au commencement de l'intervalle de temps suivant.

Dans cette hypothèse, le corps lancé horizontalement suivant la ligne AM (fig. 141), ne reste sur cette ligne que pendant un



Fig. 141.

quart de seconde. Au bout de ce temps, arrivé en B, il reçoit une impulsion de la pesanteur, qui lui imprime une vitesse ver-

ticale BB'; cette vitesse se compose avec la vitesse BB'' qu'il possédait, et il en résulte une vitesse BB'''. Le corps se meut pendant un quart de seconde suivant la ligne BB''', et arrivé en C, au quart de cette ligne, il reçoit une nouvelle impulsion de la pesanteur. Si l'on imagine que la vitesse qu'il possédait, en arrivant en ce point, soit décomposée en deux composantes Cc et CC'', égales et parallèles aux composantes BB', BB'', la vitesse que lui communiquera la pesanteur, par son action instantanée au point C, s'ajoutera à la composante Cc, pour former une vitesse verticale double CC'; et, après cette seconde action de la pesanteur, le corps sera animé de la vitesse CC''', résultante des vitesses CC', et CC''. De même, après un nouveau quart de seconde, le corps ayant parcouru le quart de CC''', et étant arrivé en D, pourra être regardé comme animé de deux vitesses D*d*, DD'', égales et parallèles aux composantes CC', CC''; la pesanteur agissant de nouveau, lui donnera encore, dans le sens vertical, le même accroissement de vitesse; en sorte que la composante D*d*, double de BB', sera remplacée par la vitesse DD', triple de BB', et le corps se trouvera animé de la vitesse DD''', résultante des composantes DD', DD''. Il se mouvra pendant un quart de seconde suivant cette ligne, de D en E, puis la pesanteur changera encore la grandeur et la direction de sa vitesse, et ainsi de suite indéfiniment. On voit donc que, dans l'hypothèse où nous nous sommes placés, le corps décrira le polygone ABCDE.

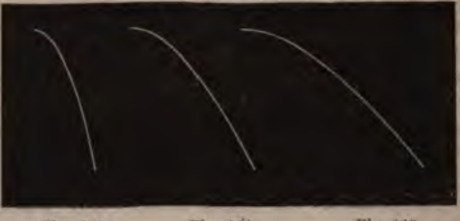
Au lieu de supposer que la pesanteur agit à des intervalles d'un quart de seconde, on pourrait admettre que c'est après chaque dixième de seconde qu'elle donne une nouvelle impulsion au corps, et l'on arriverait à un résultat analogue, si ce n'est que les côtés du polygone décrit par le corps seraient plus petits et plus nombreux, pour une même durée totale du mouvement. Enfin, si l'on revient à la réalité, on verra que la pesanteur, agissant sans cesse, fera décrire au corps, non plus un polygone, mais une ligne courbe. De plus, si l'on décompose à chaque instant la vitesse du corps en une composante horizontale et une composante verticale, on trouvera que la composante horizontale est toujours égale à la vitesse qu'on avait imprimée au corps en le lançant; tandis que la composante verticale n'est autre chose que la vitesse qui lui aurait été communiquée par la pesanteur, s'il était tombé depuis le commencement du mouvement sous la seule action de cette force, et sans qu'on l'ait lancé.

Il résulte de là que, pour se représenter le mouvement d'un corps qui a été lancé horizontalement à partir du point A (fig. 142), avec une certaine vitesse, dirigée suivant AM, on pourra conce-

voir que ce corps tombe verticalement le long de la ligne AN, sans vitesse initiale, et que cette ligne soit transportée parallèlement à elle-même, ainsi que le corps qui la décrit, avec une vitesse horizontale dirigée suivant AM, et égale à la vitesse de projection dont on vient de parler. Au bout d'une seconde, la ligne AN vient prendre la position BP; mais en même temps le corps est tombé sur cette ligne d'une quantité BG : il se trouve donc alors au point G. Au bout de deux secondes, la ligne AN se place en CQ ; mais le corps a parcouru sur cette ligne une distance CH quatre fois plus grande que BG : il est donc en H, à la fin de la deuxième seconde. On verra de même que si, sur la position DR, que prend la ligne AN après trois secondes, on porte une longueur DI égale à neuf fois BG, on aura en I la position qu'occupera le corps à cet instant ; et en continuant ainsi on trouvera les positions du corps après 4, 5, 6.... secondes. On pourra d'ailleurs trouver, tout aussi facilement, des positions intermédiaires de ce corps, telles que celles qu'il prendra, par exemple, après $\frac{1}{2}$ seconde, 1 seconde et demie, 2 secondes et demie..., de mouvement ; en sorte qu'on sera en mesure de tracer la ligne courbe qu'il décrit. Cette ligne courbe se nomme, en géométrie, une *parabole* : sa forme dépendra de la grandeur de la vitesse avec laquelle le corps aura été lancé horizontalement. Les figures 143, 144, 145 représentent les paraboles décrites par des corps lancés avec des vitesses horizontales, qui sont entre elles comme les nombres 1, 2 et 3.



Fig. 142.


Fig. 143. Fig. 144. Fig. 145.

On peut vérifier par l'expérience qu'un corps, lancé horizonta-

lement, et soumis ensuite à la seule action de la pesanteur, décrit bien une parabole, conformément à ce que nous venons de voir. A cet effet, on se sert de l'appareil représenté par la figure 146. Cet appareil consiste en un tableau de bois, sur lequel on a tracé plusieurs paraboles partant d'un même point A, et représentant les chemins que doit parcourir un corps lancé horizontalement de ce point, avec des vitesses différentes; à côté du point A se trouve un morceau de bois B qui fait saillie sur le tableau, et dont la face courbe présente une rainure longitudinale : cette rainure est disposée de telle manière qu'une bille qui la suit, en roulant sous l'action de la pesanteur, arrive au bas avec une vitesse horizontale, et que le centre de cette bille est au niveau du point A, à l'instant où elle quitte la rainure. En laissant rouler la bille successivement à partir de divers points de cette rainure, elle acquerra, en arrivant au point A, des vitesses horizontales différentes; et, après plusieurs tâtonnements, on parviendra à lui donner une vitesse telle qu'elle parcoure une des paraboles tracées sur le tableau. Pour s'assurer d'une manière plus complète que la bille suit bien exactement cette parabole, on fixe, en plusieurs points de la courbe, des anneaux à vis dans lesquels la bille peut passer facilement ; puis en la laissant rouler d'une hauteur convenable sur la rainure, on la verra traverser tous ces anneaux. La figure 146 montre les anneaux disposés le long d'une des trois paraboles qui y sont tracées ; on aperçoit le long des deux autres les trous dans lesquels on les fixera, pour faire l'expérience en donnant à la bille des vitesses initiales différentes.

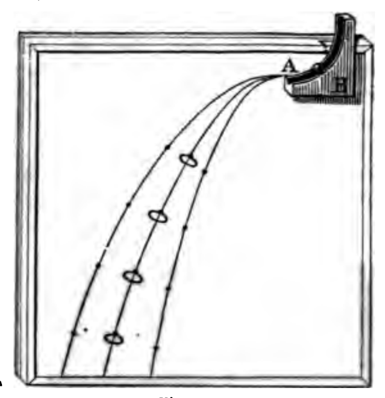


Fig. 146.

§ 106. Soit AB (fig. 147) la parabole que décrit un corps pesant, lancé horizontalement au point A, dans le sens de la flèche *f*. Si, à chaque instant de son mouvement, on décompose sa vitesse en deux composantes, l'une horizontale et l'autre verticale, on trouvera, ainsi que nous l'avons vu, que la composante horizontale reste toujours la même, et que la composante verticale

augmente proportionnellement au temps; en sorte que, lorsqu'il sera arrivé en B, il sera animé d'une vitesse résultant de la composition de la vitesse horizontale qui lui a été imprimée au point A, et de la vitesse verticale que la pesanteur lui a donnée pendant toute la durée de son mouvement.



Fig. 147.

Imaginons qu'ensuite le corps soit lancé, à partir du point B, avec la vitesse qu'il avait acquise en arrivant à ce point, mais en sens contraire, comme l'indique la flèche *f'*. La pesanteur diminuera progressivement la composante verticale de cette vitesse d'impulsion, de la même manière qu'elle avait augmenté la vitesse verticale du corps, lorsqu'il avait été lancé dans le sens de la flèche *f*; d'ailleurs la composante horizontale ne sera pas modifiée: en sorte que le corps reprendra successivement, mais dans un ordre inverse, des vitesses égales et contraires à celles qu'il avait eues précédemment. Il en résulte nécessairement que le corps repassera, en montant, par le chemin qu'il avait parcouru en descendant, c'est-à-dire qu'il décrira la même parabole AB, en allant de B vers A; et, arrivé au point A, il sera animé précisément de la vitesse horizontale avec laquelle on l'avait d'abord lancé de ce point.

Nous sommes maintenant en mesure de voir quel mouvement prendra un corps pesant, lancé obliquement suivant une direction telle que AB (fig. 148). Ce corps décrira d'abord, en montant, un arc AC de parabole; puis, arrivé au point C, où son mouvement sera dirigé horizontalement, il se trouvera dans les mêmes conditions que s'il était lancé de ce point, dans la direction CD, c'est-à-dire qu'il parcourra un nouvel arc CF de parabole. Les deux arcs AC et CF présentent une symétrie complète par rapport à la verticale qui passe par le point le plus haut C; le chemin ACF parcouru par le corps n'est qu'une portion de la parabole complète et indéfinie MCN.

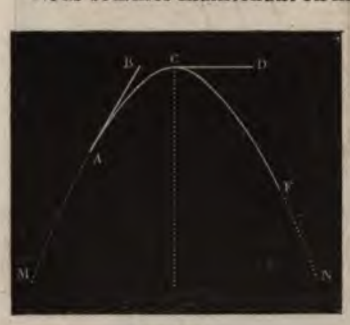


Fig. 148.

§ 107. La figure de la parabole, que décrit un corps pesant

lancé obliquement, dépend à la fois de la grandeur et de la direction de la vitesse qui lui a été imprimée. Si l'on fait varier seulement la direction de cette vitesse, sans changer sa grandeur, qu'on suppose, par exemple, que le corps soit lancé toujours de la même manière, et successivement, suivant les directions AB, AC, AD, AE (fig. 149), on lui verra décrire les différentes paraboles AB′, AC′, AD′, AE′. La première de ces paraboles s'abaisse immédiatement au-dessous de la ligne horizontale AB ; tandis que les autres, après s'être élevées au-dessus de cette ligne, viennent la rencontrer en des points G, H, K, inégalement éloignés du point A.

Chacune des distances AG, AH, AK, se nomme l'*amplitude* du jet correspondant. L'amplitude du jet varie donc avec la direction de la vitesse initiale qui a été imprimée au mobile. L'étude complète de cette question montre que, si la direction de la vitesse initiale ne fait qu'un petit angle CAB (fig. 149), avec la

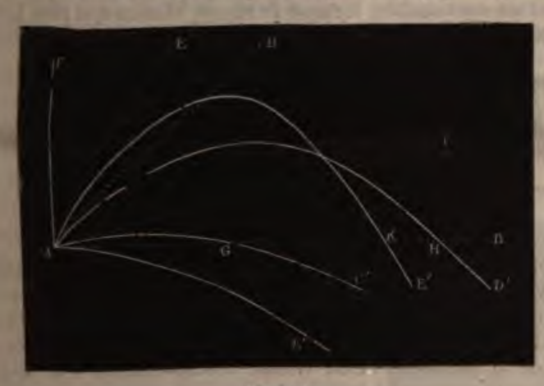


Fig. 149.

ligne horizontale, l'amplitude du jet sera petite ; que, si cette direction se relève de plus en plus au-dessus de l'horizon, l'amplitude du jet augmentera toujours, jusqu'à ce que la vitesse initiale fasse avec l'horizon un angle DAB égal à 45° ; que, si la direction de la vitesse initiale se rapproche davantage de la verticale AF, l'amplitude du jet diminue ; et qu'enfin elle devient tout à fait nulle, lorsque la vitesse d'impulsion est dirigée suivant AF. C'est donc sous un angle de 45° avec l'horizon, que le corps devra être lancé, pour que, à égalité de vitesse, l'amplitude du jet atteigne sa plus grande valeur. On trouve, en outre, que

cette plus grande valeur AH est le double de la hauteur AF, à laquelle le corps se serait élevé, s'il avait été lancé verticalement, et de bas en haut, avec la même vitesse.

§ 108. Dans le tir des projectiles, lorsqu'on veut atteindre un but déterminé, on ne doit pas lancer le mobile suivant la ligne droite qui va joindre le but. On voit, d'après ce qui précède, qu'on doit toujours diriger son mouvement initial au-dessus de cette ligne droite, afin qu'il puisse atteindre le but, en décrivant la parabole que la pesanteur lui fait nécessairement décrire. C'est ce qu'on a toujours le soin d'observer dans le tir du canon, et l'adresse de l'artilleur consiste principalement à donner au canon une inclinaison convenable, pour tenir compte de la déviation que le mouvement du boulet éprouvera, par suite de l'action de la pesanteur.

Dans le tir du fusil, on dirige le canon au moyen de deux points de repère placés vers ses deux extrémités. On juge qu'il a bien la direction convenable, lorsque le rayon visuel qui passe par ces deux points A, B (fig. 150), va aboutir au but qu'on veut attein-

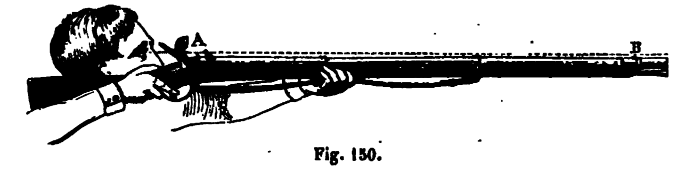


Fig. 150.

dre. Cette ligne de visée se trouvant parallèle à l'axe du canon, si le projectile part exactement suivant cet axe, il devra nécessairement arriver un peu au-dessous du but; mais la déviation que la pesanteur lui fait ainsi éprouver est très-peu de chose, en raison de la grandeur de sa vitesse relativement à la distance qu'il a ordinairement à parcourir.

Cependant, dans les fusils perfectionnés, tels que les carabines

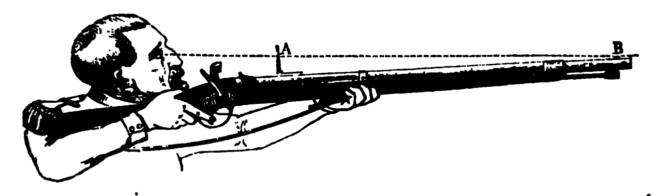


Fig. 151.

Minié, à l'aide desquels on peut atteindre à une distance très-

grande, on a rendu mobile le point de repère qui est le plus rapproché de l'œil; on peut élever ou abaisser à volonté ce point de repère, suivant que le but à atteindre est plus ou moins éloigné. De cette manière, en visant le but à l'aide du repère fixe B (fig. 151), et du repère mobile A, qu'on a suffisamment éloigné du canon, la balle part suivant une direction oblique par rapport à la ligne AB, elle décrit sa parabole, et peut ainsi arriver au point qu'on veut atteindre.

§ 109. **Mouvement des corps célestes.** — L'astronomie nous enseigne que la terre et les autres planètes sont des corps isolés, libres, qui circulent autour du soleil, en décrivant des courbes fermées qui approchent beaucoup d'être des cercles; de même, la lune décrit à peu près un cercle autour de la terre. Il va nous être facile de nous rendre compte de la manière dont se produisent ces mouvements curvilignes.

Si la terre, à un instant donné, était soustraite à l'action de toute force extérieure, elle se mouvrait uniformément et en ligne droite, en raison de la vitesse qu'elle posséderait à cet instant. Puisqu'elle se meut en ligne courbe, il faut qu'elle soit soumise à l'action d'une force qui la dérange, à chaque instant, du mouvement rectiligne qu'elle tend à prendre en vertu de son inertie. Newton a démontré que cette force est dirigée vers le centre du soleil, comme l'indique la flèche tracée sur la figure 152, où S est le soleil et T la terre; en sorte que les choses se passent comme si le soleil attirait la terre. Il a démontré de plus que la grandeur de cette force de gravitation varie en raison inverse du carré de la distance de la terre au soleil. Sous l'action d'une pareille force, la terre tend à tomber vers le soleil, de même qu'une pierre, soumise à la pesanteur, tombe sur le sol : la terre tomberait en effet sur le soleil, si elle n'avait pas de vitesse initiale, ou bien si sa vitesse était dirigée suivant la ligne TS. Mais la vitesse qu'elle possède, suivant la tangente TA à la ligne courbe qu'elle vient de décrire, l'empêche de tomber ainsi : elle se trouve dans les mêmes conditions qu'un corps pesant qu'on lance suivant une direction horizontale, ou presque horizontale. Si elle ne décrit pas comme lui une parabole, cela tient à ce que, à mesure qu'elle se déplace, la force qui agit sur elle, passant toujours par le centre du soleil, change constamment de direction; tandis que, dans le cas d'un corps pesant qu'on lance à la surface de la



Fig. 152.

terre, on regarde la pesanteur comme agissant sur lui toujours dans la même direction, à cause de la petitesse du chemin que parcourt ce corps relativement aux dimensions de la terre. Il est vrai que, quelle que soit la vitesse avec laquelle on lance un corps pesant, on le voit toujours tomber sur la terre au bout de quelque temps; et en raison de l'analogie que nous établissons entre le mouvement de ce corps et le mouvement de la terre autour du soleil, il semble que nous soyons conduits à en conclure, contrairement à ce que l'on observe, que la terre doit finir par tomber sur le soleil; mais on va voir qu'il n'en est pas ainsi.

Si un boulet de canon est lancé horizontalement avec des vitesses de plus en plus grandes, il va tomber sur la terre, en des points de plus en plus éloignés et la parabole qu'il décrit a une courbure de moins en moins prononcée. Ce boulet rencontrerait toujours la surface de la terre, quelque grande que fût sa vitesse de projection, si cette surface était un plan, comme le montre la figure 153. Mais la surface de la terre est courbe, puisqu'elle a à très-peu près la figure d'une sphère : le boulet ne tombera donc sur le sol qu'autant que la parabole AB ou AC, ou AD (fig. 154), que la pesanteur lui fait décrire, sera plus courbée que la surface de la terre. Dès le moment que sa vitesse de projection sera assez grande pour que la parabole AE qu'il décrira ne soit pas plus courbée que la surface de la terre, il ne tombera plus sur cette surface. Dans ce dernier cas le boulet se transportant très-loin de son point de départ, il n'est plus permis de supposer que la pesanteur agit sur lui dans des directions parallèles, et en conséquence il ne décrira plus une parabole. Il doit être regardé comme étant soumis à l'action d'une force dont la direction passe toujours par le centre de la terre; lorsqu'il aura décrit un arc AA′, sans se rapprocher de la terre, il se trouvera donc exactement dans les mêmes conditions qu'au commencement de son mouvement; il continuera à se mouvoir de la même manière, et tournera ainsi indéfiniment autour de la surface de la terre, sans

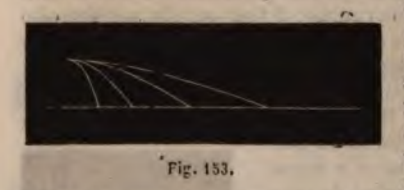


Fig. 153.



Fig. 154.

jamais la rencontrer, à moins qu'une cause extérieure, telle que la résistance de l'air, ne vienne diminuer sa vitesse. Pour qu'un boulet lancé horizontalement se meuve, comme nous venons de le dire, sans tomber sur le sol, et constitue ainsi une espèce de satellite de la terre, comme la lune, il faudrait lui imprimer une vitesse d'un peu moins de 8000 mètres par seconde.

La terre, dans son mouvement autour du soleil, se trouve précisément dans le cas du boulet dont nous venons de parler : la vitesse qu'elle possède, à un instant quelconque, est assez grande pour lui faire décrire à peu près un cercle autour du soleil. Il en est de même des autres planètes, dans leur mouvement autour du soleil, et de la lune dans son mouvement autour de la terre.

§ 110. **Mouvement circulaire, force centrifuge.** — Lorsqu'on fait tourner rapidement un corps A (fig. 155), attaché à une des extrémités d'une corde AB, dont l'autre extrémité B est fixe, la corde se tend, et elle pourrait même se rompre, si le mouvement de rotation était assez rapide. Cela provient de ce que le corps tend, à chaque instant, à se mouvoir en ligne droite, suivant la direction du mouvement qu'il avait dans l'instant précédent : la corde ne peut donc l'obliger à se mouvoir suivant une circonférence de cercle, qu'en exerçant sur lui une force de traction dirigée vers le centre ; le corps réagit, et c'est cette réaction qui détermine la tension de la corde. Pendant que le corps tourne, il agit sur la corde de la même manière que s'il était soumis à l'action d'une force qui tendrait à l'éloigner du centre de son mouvement : cette force se nomme *force centrifuge.*



Fig. 155

La force centrifuge est développée par l'obligation dans laquelle se trouve le corps de décrire une circonférence de cercle : aussitôt que cette obligation cesse, la force centrifuge est anéantie. Si, par exemple, pendant le mouvement de rotation, on vient à couper la corde, le corps se mouvra suivant la tangente AC, menée par le point du cercle où il était lorsqu'on l'a rendu libre ; son mouvement ne sera que la continuation de celui qu'il avait à l'instant où l'on a coupé la corde, et ne sera modifié en aucune manière par la force centrifuge qui a cessé d'exister à cet instant même. La force centrifuge détermine donc la tension de la corde, elle peut même occasionner sa

rupture; mais elle n'agit plus dès que le corps a cessé d'être obligé de décrire le cercle.

La fronde qui sert à lancer des pierres consiste, comme on sait, en un morceau de toile ou de peau, auquel sont attachées deux petites cordes (fig. 156). On place une pierre, comme la figure l'indique, on saisit les extrémités des deux cordes, et l'on imprime à la fronde un mouvement rapide de rotation autour de la main. Pendant ce mouvement, les cordons sont tendus par la force centrifuge; et si, à un instant donné, on abandonne un des deux cordons, la pierre, rendue libre, ne décrit plus la circonférence qu'elle décrivait précédemment : elle part suivant la tangente à cette circonférence, menée par le point où elle se trouvait lorsqu'elle a cessé d'être retenue par la fronde. L'adresse de celui qui se sert de cet instrument consiste à abandonner la pierre en un point convenable A (fig. 157), pour que, partant de ce point suivant la tangente au cercle, puis décrivant une parabole sous l'action de la pesanteur, elle puisse arriver au point B que l'on veut atteindre.



Fig. 157.

§ 111. La force centrifuge qui se développe dans un mouvement de rotation peut être rendue sensible à l'aide des expériences suivantes.

La figure 158 représente un appareil ABC, supporté par un pied solide de bois, et qui peut tourner horizontalement sur ce pied : en tirant une corde qui fait plusieurs tours sur la partie cylindrique A, on peut donner à l'appareil un mouvement rapide de rotation. Entre les deux points B et C se trouve un fil métallique bien tendu, le long duquel peuvent se mouvoir deux billes d'ivoire D, E, traversées par ce fil. La bille D étant placée comme l'indique la figure, si l'on vient à faire tourner rapidement l'appareil, on la voit s'éloigner du centre du mouvement et se transporter à l'extrémité B du fil métallique. La bille E, se trouvant dans des conditions semblables, tend aussi à se transporter en C; mais elle

Fig. 156.

en est empêchée par un ressort en hélice, qui a été disposé tout



Fig. 158.

autour du fil. La bille E s'éloigne cependant du centre de son mouvement ; elle comprime le ressort, et la tension qu'elle lui communique ainsi peut servir de mesure à la force centrifuge développée par le mouvement de rotation.

La figure 159 représente un autre appareil qui se monte sur

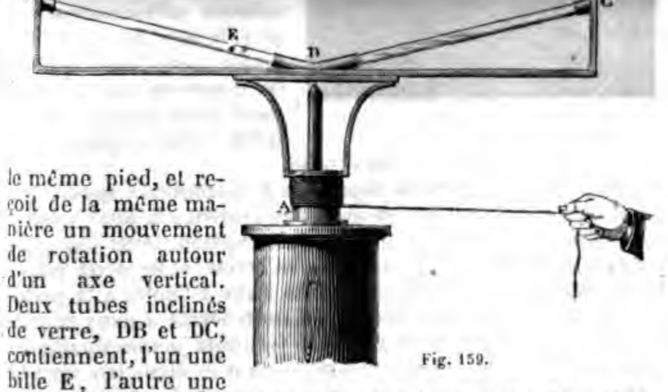


Fig. 159.

le même pied, et reçoit de la même manière un mouvement de rotation autour d'un axe vertical. Deux tubes inclinés de verre, DB et DC, contiennent, l'un une bille E, l'autre une certaine quantité d'eau. Lorsqu'on fait tourner rapidement ces deux tubes, on voit la bille et l'eau monter vers leurs extrémités supérieures B, C. Pour nous rendre compte de la manière dont se produit ce mouvement ascendant, examinons ce qui arriverait si, pendant la rotation de l'appareil, la bille se trouvait en

un point quelconque du tube qui la contient. Cette bille est soumise à l'action de son poids qui est une force verticale EF (fig. 160), et, en outre, à l'action de la force centrifuge EG, qui est dirigée de manière à l'éloigner de l'axe de rotation; elle est donc dans les mêmes conditions que si elle était soumise à l'action de la force unique EH, résultante des deux forces précédentes.

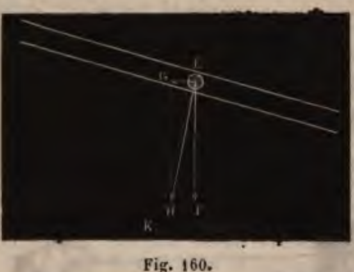


Fig. 160.

Si cette force EH est dirigée au-dessous de la perpendiculaire EK à la direction du tube (fig. 160), la bille descendra vers la partie inférieure du tube ; mais si, la force centrifuge étant plus grande, la résultante EH est dirigée au-dessus de la perpendiculaire EK (fig. 161), la bille montera le long du tube. On voit donc, qu'en développant une force centrifuge assez grande, c'est-à-dire en produisant un mouvement de rotation suffisamment rapide, la bille devra s'élever jusque vers l'extrémité B. On comprend par là comment l'eau pourra également s'élever jusqu'à la partie supérieure de l'autre tube.

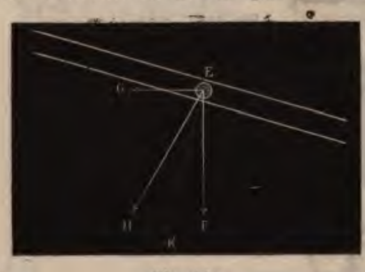


Fig. 161.

La figure 162 montre la disposition d'un troisième appareil, à l'aide duquel on peut encore mettre en évidence la force centrifuge développée par le mouvement de rotation. Deux lames de ressorts très-flexibles sont courbées en cercle, et les deux extrémités de chacune d'elles sont fixées l'une à l'autre à la partie inférieure ; en sorte que ces deux ressorts forment deux cercles complets, disposés dans deux plans verticaux perpendiculaires entre eux. Une tige de fer, dirigée suivant le diamètre vertical commun aux deux cercles, est fixée à chacun d'eux à sa partie inférieure, tandis qu'à la partie supérieure, elle les traverse librement, en passant dans des trous qui ont été pratiqués dans les ressorts. Cette disposition permet de déformer les cercles en abaissant ou élevant leur partie supérieure avec la main. La tige de fer

peut recevoir un mouvement rapide de rotation sur elle-même, à l'aide d'une manivelle et d'une corde sans fin; et comme elle est fixée à la partie inférieure des ressorts, elle leur communique ce mouvement. Aussitôt que les ressorts tournent, on les voit se déformer; le diamètre vertical se raccourcit, le diamètre horizontal s'allonge, comme le montre la figure 162 : et cette

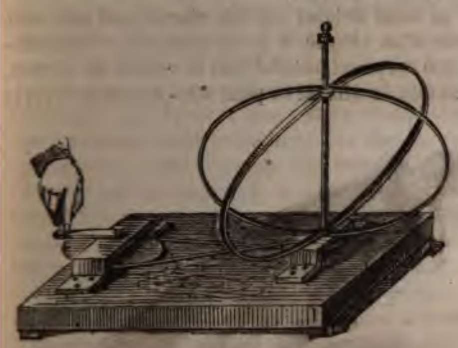


Fig. 162.

déformation est d'autant plus marquée que le mouvement de rotation est plus rapide. On voit encore ici un effet de la force centrifuge : pendant que les ressorts tournent, toutes leurs molécules sont dans les mêmes conditions que si elles étaient tirées par des forces qui tendraient à les éloigner de l'axe de rotation; et il est clair que, sous l'action de pareilles forces, les ressorts doivent s'allonger dans le sens horizontal.

Si l'on suspend un vase plein d'eau à l'extrémité d'une corde dont on tient l'autre extrémité dans la main, et qu'on fasse tourner le tout comme une fronde, le vase restera plein, quoique, lorsqu'il est au haut du cercle qu'on lui fait décrire, il soit complétement renversé (fig. 163). Cela vient de ce que, pendant tout le mouvement, l'eau contenue dans le vase n'est pas soumise à la seule action de son poids : la force centrifuge qui se développe modifie l'effet qui serait produit, si la première force agissait seule. Lorsque le vase est au

Fig. 163.

haut du cercle qu'il décrit, l'eau tend à tomber en vertu de son poids; mais la force centrifuge, qui est dirigée de bas en haut, tend au contraire à la faire monter : il suffit donc que cette dernière force soit plus grande que la première, pour que l'eau se maintienne dans le vase sans tomber.

§ 112. La force centrifuge va nous donner l'explication de certains faits qu'on observe quelquefois.

Lorsqu'un écuyer se tient debout sur un cheval qui parcourt rapidement le contour d'un cirque, il ne se place pas verticalement sur le cheval : son corps est penché vers le centre du cirque, et il l'est d'autant plus que le cheval va plus vite (fig. 164). C'est la



Fig. 164.

force centrifuge qui l'oblige à prendre cette position ; il tomberait nécessairement, s'il se plaçait sur le cheval de la même manière que lorsque celui-ci ne marche pas. Les forces centrifuges, qui se développent dans les diverses parties du corps de l'écuyer, se composent en une force unique, qui est dirigée horizontalement, et qui tend à l'éloigner du centre du cirque ; cette force se compose, à son tour, avec le poids de son corps, et, pour qu'il ne tombe pas, sous l'action de la résultante qui est oblique, il faut qu'il s'incline comme elle, afin qu'elle passe à l'intérieur de son polygone d'appui sur le cheval (§ 42).

Lorsque, dans les mêmes circonstances, un cheval tourne dans le cirque avec une grande vitesse, on voit quelquefois un écuyer, assis de côté, ne poser que sur le flanc du cheval. Il tomberait infailliblement s'il n'était soumis qu'à l'action de la

teur; mais la force centrifuge le maintient en équilibre, ıe dans le cas précédent.

ıs les ateliers où des meules de grès sont animées de mounts rapides de rotation, il arrive quelquefois qu'une meule se en éclats, et que les morceaux en sont lancés de tous avec une grande vitesse, ce qui peut donner lieu à des ents très-graves. Pour se rendre compte de cet effet, on vera que, pendant le mouvement d'une meule, chaque ule est soumise à une force centrifuge qui tend à l'éloide l'axe de rotation; mais les forces moléculaires qui veloppent aussitôt que les molécules tendent à se déplacer ıes par rapport aux autres, s'opposent à l'action des forces fuges. Habituellement les forces moléculaires sont assez ıntes pour vaincre les forces centrifuges; mais si une est en mauvais état et que son mouvement s'accélère les dernières forces finissent par l'emporter, et la meule en éclats. Il ne faut pas croire cependant que ce soit la centrifuge qui lance les morceaux de la meule de tous La force centrifuge existe tant que la meule est entière; elle qui détermine sa rupture; mais dès l'instant qu'un eau de la meule est détaché, il n'est plus soumis à cette et ne se meut qu'en vertu de la vitesse qu'il possédait à ınt où il s'est détaché.

13. On se sert, dans diverses circonstances, de la force ifuge pour produire un effet utile. Nous en verrons plusieurs ples, mais pour le moment nous nous contenterons d'indile suivant.

emploie, depuis quelques années, des machines à force ifuge pour sécher promptement les tissus. La figure 165 sente une machine de ce genre, telle qu'il en existe dans eurs des lavoirs publics de Paris. Un tambour de cuivre AA estiné à recevoir le linge mouillé. Ce tambour est divisé par cloison cylindrique en un compartiment central qui doit vide, et un compartiment annulaire existant tout autour emier, qui doit contenir le linge. Cette disposition est desà empêcher qu'on ne mette le linge trop près de l'axe du our. Un couvercle, qui s'enlève à volonté, permet d'introle linge, et lorsque le tambour est convenablement chargé, met le couvercle, en l'assujettissant fortement. Le tambour aversé par un axe B, qui le supporte seul, et avec lequel il tourner; il est d'ailleurs placé dans un autre tambour, ement de cuivre, qui est solidement fixé.

ur sécher le linge, on fait tourner rapidement le tambour

mobile ; on lui fait faire jusqu'à 1 500 tours par minute. Ce mouvement de rotation développe une force centrifuge très-grande

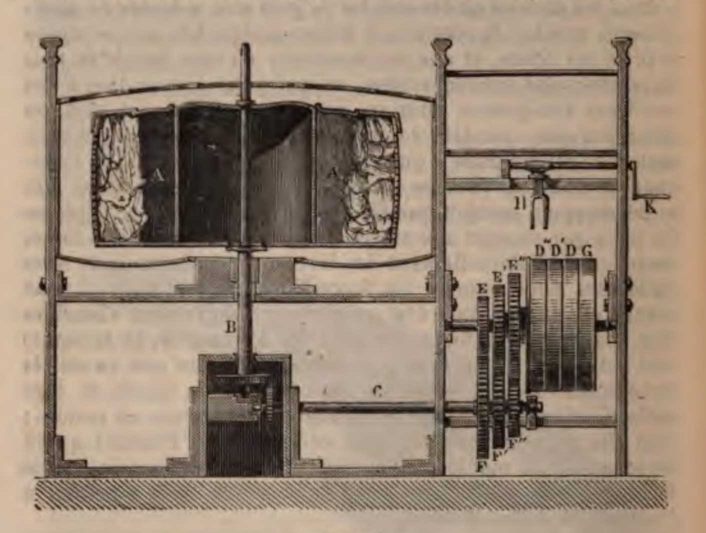


Fig. 165.

sur chaque molécule du linge et de l'eau dont il est imprégné ; le linge est appliqué fortement contre la paroi extérieure du tambour, l'eau sort par les petits trous dont cette paroi est criblée, et elle se réunit à la partie inférieure du tambour fixe, d'où elle s'écoule par un orifice pratiqué à cet effet. Lorsque le linge a été soumis à cette opération pendant 10 à 15 minutes, suivant les cas, il a perdu la presque totalité de l'eau qu'il contenait, et il suffit qu'il soit étendu à l'air pendant quelques instants, pour qu'il devienne tout à fait sec.

Le mouvement est transmis d'un axe horizontal C, à l'axe vertical B, par deux roues d'angle placées au-dessous du tambour ; l'axe C reçoit d'ailleurs son mouvement d'un autre axe qui lui est parallèle, et qu'une courroie sans fin fait tourner (voy. § 57). Mais il s'agit de donner à l'axe C, et par suite à l'axe B, un mouvement très-rapide, et il y aurait des inconvénients graves à produire trop brusquement un pareil mouvement ; aussi la communication de l'axe sur lequel agit la courroie avec l'axe C permet-elle de faire tourner successivement ce dernier

axe avec des vitesses de plus en plus grandes, jusqu'à ce qu'on arrive à la vitesse qui convient à l'opération. Pour cela la courroie peut agir successivement sur diverses poulies D, D', D". La poulie D est fixée à l'axe qui porte la roue dentée E; la poulie D' est fixée à un cylindre creux qui peut tourner librement autour de cet axe, et qui porte la roue E'; et la poulie D" est fixée à un second cylindre creux qui peut tourner autour du précédent, et qui porte la roue E". La figure 166, qui est une coupe, fait bien voir la disposition dont il s'agit. Lorsque la courroie agit sur la poulie D, cette poulie fait tourner la roue E, qui engrène avec la roue F fixée sur l'axe C; en même temps, les roues F', F", font tourner les roues E', E", et par suite les poulies D', D"; mais la communication du mouvement de la courroie à l'axe C se fait par les roues E, F, seulement, et est exactement la même que si les roues E', E", F', F", et les poulies D', D" n'existaient pas. Lorsque ensuite on fait passer la courroie de la poulie D à la poulie D', c'est la roue E' que la courroie fait tourner, et cette roue fait tourner l'axe C en agissant sur la roue F': le mouvement est communiqué comme si la poulie D' et les roues E', F' existaient seules. Enfin, lorsque la courroie passe sur la poulie D", le mouvement est transmis à l'axe C par les roues E", F". On voit donc que la courroie, marchant toujours de la même manière, et donnant successivement la même vitesse aux poulies D, D', D", communique à l'axe C des vitesses croissantes, en raison du changement du rapport entre les rayons des roues dentées qui servent à effectuer cette communication de mouvement.

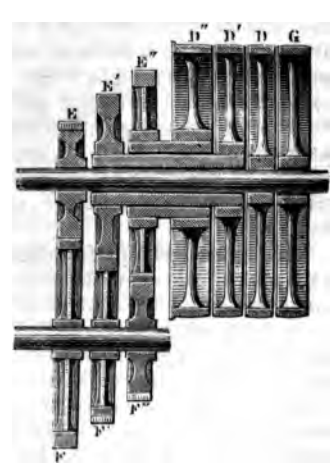


Fig. 166.

A côté de la poulie D, se trouve une poulie folle G, sur laquelle on fait passer la courroie, lorsqu'on veut que l'axe C ne tourne pas. Une fourchette H, qui embrasse la courroie, est destinée à la maintenir sur l'une ou l'autre des poulies. Lorsqu'on veut faire passer la courroie d'une poulie à une autre, on

fait marcher la fourchette, à l'aide d'une vis qui se termine par une manivelle K; la tête de la fourchette est munie d'un écrou qui s'avance à droite ou à gauche, suivant qu'on fait tourner la manivelle K dans un sens ou dans l'autre : la fourchette est d'ailleurs dirigée dans ce mouvement par une rainure qu'elle traverse, et le long de laquelle elle doit se mouvoir.

§ 114. La force centrifuge, qui est développée dans le mouvement circulaire et uniforme d'un corps, n'a pas toujours la même intensité; elle varie avec la vitesse du corps, et aussi avec les dimensions du cercle qu'il décrit. La mécanique rationnelle fait connaître la loi de ces variations, et voici en quoi elle consiste : *La force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse du corps, et en raison inverse du rayon du cercle qu'il décrit.* D'après cette loi, si le corps, tout en parcourant le même cercle, prend une vitesse 2 fois, 3 fois, 4 fois plus grande que celle qu'il avait, la force centrifuge qui en résultera sera 4 fois, 9 fois 16 fois plus grande qu'elle n'était auparavant; si le corps décrit, avec une même vitesse, un cercle de rayon double, triple, quadruple du rayon du cercle qu'il décrivait d'abord, la force centrifuge se réduira à la moitié, au tiers, au quart de sa valeur primitive.

Dans le mouvement de rotation d'un corps solide autour d'un axe, chacune de ses molécules décrit un cercle particulier, et il en résulte une force centrifuge appliquée à cette molécule. La vitesse de la molécule varie de la même manière que la vitesse angulaire du corps ; la force centrifuge qui se développe est donc proportionnelle au carré de cette vitesse angulaire. D'un autre côté, si l'on passe d'une molécule A à une molécule B située deux fois plus loin de l'axe de rotation que la première, la vitesse de cette molécule B sera le double de la vitesse de l'autre ; en sorte que, pour cette raison, la force centrifuge qui se développe en B doit être quatre fois plus grande que celle qui se développe en A. Mais aussi le rayon du cercle décrit par la molécule B étant le double de l'autre rayon, la force centrifuge doit être, en B, la moitié de ce qu'elle serait sans cette circonstance : donc, en définitive, la force centrifuge en B est seulement double de ce qu'elle est en A. D'après cela on peut énoncer la loi suivante : *Dans le mouvement de rotation d'un corps autour d'un axe fixe, les forces centrifuges qui se développent aux différents points du corps sont proportionnelles au carré de la vitesse angulaire, et aussi proportionnelles aux distances de ces divers points à l'axe de rotation.*

§ 115. **Transmission du mouvement dans les corps.** —

Lorsqu'une force est appliquée à une partie d'un corps, le mouvement qu'elle produit se transmet ordinairement à toutes les autres parties; mais cette transmission ne se fait pas instantanément. Si le corps était tout d'une pièce, s'il avait une figure rigoureusement invariable, il n'en serait pas ainsi : dès le moment que la partie soumise à l'action de la force céderait à cette action et se mettrait en mouvement, tout le reste du corps se mouvrait en même temps. Mais on doit se rappeler que les corps sont formés d'une multitude de molécules, qui sont placées à côté les unes des autres sans se toucher. Lorsqu'une force agit directement sur quelques-unes de ces molécules, elles se mettent immédiatement en mouvement; par là elles s'éloignent ou se rapprochent des molécules voisines, l'équilibre qui existait entre les diverses parties du corps est troublé, et il en résulte le développement de forces moléculaires qui mettent ces molécules voisines en mouvement; celles-ci déterminent à leur tour, et de la même manière, le mouvement des molécules qui les suivent, et le mouvement se communique ainsi, de proche en proche, à toutes les molécules du corps.

Ordinairement cette communication de mouvement, dans les corps solides, est extrêmement rapide; en sorte qu'on voit les choses se passer comme si les diverses molécules étaient attachées les unes aux autres d'une manière invariable. Mais, dans certains cas, la transmission du mouvement aux diverses parties d'un corps est très-facile à apercevoir.

Supposons qu'un ressort, tel que ceux qui ont été décrits dans les §§ 17 et 18, soit attaché à un corps, et en fasse, pour ainsi dire, partie intégrante; lorsqu'on voudra faire mouvoir le corps, en appliquant une force au ressort, on verra la partie du ressort qui est directement soumise à la force se mettre aussitôt en mouvement, le ressort se déformera, puis, après un temps très-court, le reste du corps sera entraîné.

C'est ce qui arrive encore lorsqu'un convoi de wagons, qui était au repos, commence à se mettre en marche. Les wagons sont attachés les uns aux autres par des chaînes qui aboutissent à des ressorts fixés sous les caisses. Deux wagons ainsi réunis sont habituellement en contact; mais, si l'on cherchait à les écarter l'un de l'autre, en leur appliquant des forces assez grandes, les ressorts fléchiraient, et le contact cesserait d'avoir lieu. Dès que la locomotive, qui est en tête du convoi, exerce une force de traction sur le premier wagon qui la suit, elle le met en mouvement; les ressorts par lesquels ce premier wagon est relié au second se tendent, et au bout d'un certain temps, le second wa-

gon commence à marcher; les ressorts qui existent entre le second wagon et le troisième se tendent à leur tour, puis le troisième wagon est entraîné, et le mouvement se communique ainsi successivement à la totalité du convoi. Pendant le mouvement, les ressorts de jonction reprennent leur forme primitive, et les wagons se remettent en contact les uns avec les autres; le convoi se trouve alors disposé comme avant le départ, et peut être assimilé dans son ensemble à un seul corps solide en mouvement.

Ce qui se passe dans ce dernier exemple doit faire comprendre ce qui a lieu entre les diverses molécules d'un corps solide, et peut en donner, pour ainsi dire, une image excessivement agrandie. On voit, en effet, que les différents wagons jouent le rôle des molécules du corps qui se mettent successivement en mouvement; et que les ressorts qui les unissent tiennent lieu des forces intérieures qui se développent entre ces molécules, et par lesquelles le mouvement se transmet de proche en proche.

§ 116. C'est ici le lieu d'entrer dans quelques détails sur les impressions qu'on éprouve, lorsqu'on est emporté par une voiture ou un bateau en mouvement.

Si le mouvement de la voiture ou du bateau était parfaitement régulier, on ne s'apercevrait nullement de sa marche; la vue d'objets extérieurs, qu'on sait être immobiles, tels que des arbres, des maisons, serait indispensable pour qu'on pût reconnaître qu'on n'est pas en repos. Il n'y a donc, dans le mouvement dont on est animé que les irrégularités de ce mouvement qui se fassent sentir directement.

Supposons qu'on soit assis dans une voiture, et qu'on aille en avant, c'est-à-dire qu'on ait la figure tournée du côté vers lequel la voiture marche. Si le mouvement de la voiture vient à s'accélérer brusquement, cette accélération de mouvement se transmet d'abord aux parties inférieures du corps, qui sont immédiatement en contact avec la voiture, et le haut du corps, n'y participant pas de suite, se trouve rejeté en arrière. Si, au contraire, le mouvement de la voiture se ralentit brusquement, ce ralentissement se transmet encore aux parties inférieures du corps avant d'atteindre les parties supérieures, et le haut du corps se porte en avant, comme s'il avait reçu une impulsion. Lorsqu'on va en arrière, c'est-à-dire qu'on tourne le dos au côté vers lequel la voiture s'avance, les choses se passent d'une manière inverse. Une accélération brusque du mouvement fait incliner le haut du corps en avant; tandis qu'un ralentissement brusque le fait incliner en arrière.

Un grand nombre de personnes éprouvent des nausées lorsque, étant en voiture, elles vont en arrière : voyons si cet effet peut avoir une cause dans le mouvement lui-même. Lorsque le mouvement est parfaitement régulier, on ne s'en aperçoit pas ; les diverses parties du corps sont, les unes par rapport aux autres, exactement dans les mêmes conditions que si le corps était en repos : il est donc impossible que, dans ce cas, le sens du mouvement ait la moindre action sur les organes. La terre, dans son mouvement autour du soleil, est animée d'une très-grande vitesse, puisqu'elle parcourt plus de 30 kilomètres en une seconde : cependant nous ne distinguons pas si nous allons en avant ou en arrière lorsque nous nous tournons soit du côté de l'orient, soit du côté de l'occident. Il n'y a donc que les irrégularités du mouvement qui puissent occasionner le malaise que nous cherchons à expliquer. Mais, si nous réfléchissons à ce qui a été dit il n'y a qu'un instant, nous verrons que ces irrégularités se font sentir de la même manière, quel que soit le sens dans lequel on marche ; ce qu'une accélération du mouvement produit lorsqu'on va en avant, un ralentissement le produit de même lorsqu'on va en arrière. Or, dans le mouvement d'une voiture, des accélérations et des ralentissements de diverses grandeurs s'entremêlent en se succédant : en sorte qu'on doit en conclure que les effets produits sur les organes sont les mêmes, soit qu'on aille en avant, soit qu'on aille en arrière. Il y a d'ailleurs une observation que bien des personnes ont pu faire : lorsque, pendant la nuit, on s'est endormi quelque temps dans une voiture fermée qui est en mouvement, et qu'on se réveille, on ne peut pas distinguer le sens du mouvement de la voiture ; on a besoin de se rappeler la manière dont on s'est placé, pour savoir si l'on marche en avant ou en arrière. Les irrégularités du mouvement produisent donc exactement le même effet sur les organes, quel que soit le sens de la marche, puisqu'elles ne peuvent pas servir à faire reconnaître ce sens.

On est obligé de conclure de ce qui vient d'être dit que, dans la marche en arrière, il n'y a pas de cause mécanique qui puisse occasionner des nausées. Ce qui les produit, c'est uniquement la vue des objets extérieurs. Lorsqu'on est accoutumé à aller en avant dans une voiture, les objets à côté desquels on passe semblent se déplacer d'une certaine manière ; si, contrairement à l'habitude qu'on a contractée, on se place dans une voiture de manière à aller en arrière, les objets qui sont au bord de la route sembleront encore se déplacer, mais autrement qu'à l'ordinaire, et il en résultera une espèce d'étourdissement, qui est la seule

cause des nausées qu'on éprouve en pareil cas. Il suffirait donc de se soustraire, par un moyen quelconque, à la vue des objets extérieurs, pour faire disparaître la cause du malaise qu'on ressent et par suite le malaise lui-même.

Nous venons de voir qu'il n'y a pas, dans la marche en arrière, de cause mécanique qui puisse agir sur les organes, par la raison que les secousses, les mouvements plus ou moins irréguliers qui sont transmis au corps par la voiture, sont les mêmes, quel que soit le sens dans lequel on marche ; mais, si le sens du mouvement ne peut rien produire, il peut y avoir, dans le mouvement lui-même, une cause mécanique de malaise. C'est ainsi que le mal de mer est occasionné par les balancements successifs que les vagues transmettent au navire sur lequel on se trouve. Dans ce mouvement de balancement, chaque molécule du corps, au lieu de se mouvoir en ligne droite, décrit une ligne sinueuse, telle que la ligne AB (fig. 167). Au moment où cette molécule se trouve dans l'une des parties inférieures de la ligne qu'elle est obligée de parcourir, en C, par exemple, elle est à peu près dans les mêmes conditions que si elle se mouvait le long d'une circonférence de cercle CC'C'' : il se développe donc une force centrifuge qui détermine une pression de la molécule sur celles qui sont dans son voisinage. Un effet analogue se produit, lorsque cette molécule se trouve en D, dans une des parties supérieures de la ligne AB ; la force centrifuge qui s'y développe donne lieu à une pression dirigée en sens contraire de la précédente. Ainsi, par suite du balancement continuel du navire, les organes qui sont à l'intérieur du corps exercent les uns sur les autres des pressions différentes de celles qui ont lieu à l'état de repos, pressions qui varient d'ailleurs continuellement et insensiblement d'un moment à un autre ; on conçoit bien qu'il puisse en résulter un malaise, et c'est en effet ce qui occasionne le mal de mer.



Fig 167.

§ 117. **Choc de deux corps.** — Lorsqu'un corps est en mouvement, et qu'il en rencontre un autre qui est en repos, ou qui n'a pas le même mouvement que lui, il se produit un *choc*. Nous allons examiner de quelle manière les mouvements des deux corps se trouvent brusquement modifiés par l'effet de ce choc.

Supposons, pour simplifier, qu'il s'agisse de deux corps sphéri-

ques A, B (fig. 168), qui se meuvent tous deux suivant une même ligne droite CD, et dans le même sens indiqué par la flèche. Pour qu'il puisse se produire un choc entre ces deux corps, il est nécessaire que la vitesse du corps A, qui est en arrière, soit plus grande que celle du corps B ; s'il en est ainsi, le premier se rapprochera de plus en plus du second, et bientôt le choc aura lieu.

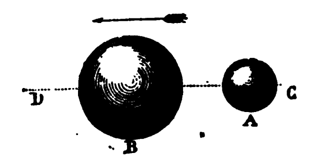


Fig. 168.

A l'instant où le corps A atteindra le corps B, il tendra à faire marcher plus vite les premières molécules de ce corps, et cette accélération de mouvement se transmettra à toute la masse du corps B. Mais nous avons vu que la transmission du mouvement ne s'effectue pas instantanément : aussi en résultera-t-il une déformation dans le corps B. Les premières molécules atteintes céderont à l'impulsion qu'elles auront reçue ; elles prendront une vitesse plus grande que celle du reste du corps, et se rapprocheront ainsi de son centre. Les molécules voisines, poussées par les forces moléculaires qui se développeront, prendront, à leur tour, un mouvement plus rapide, et se rapprocheront aussi du centre du corps B. En sorte que, au bout d'un intervalle de temps qui est toujours extrêmement court, le corps B se trouvera aplati, dans l'endroit où le corps A l'aura atteint.

Mais ce qui a lieu pour le corps B a lieu de même pour le corps A. Les molécules de celui-ci qui sont en avant, en rencontrant le corps B, qui est un obstacle à la continuation de leur mouvement, doivent se ralentir brusquement ; celles qui les suivent se ralentissent à leur tour, et le corps A s'aplatit comme l'autre, du côté par lequel le contact a eu lieu. La figure 169 montre en quoi consiste cet aplatissement simultané des deux corps, tout en l'exagérant, afin de le rendre plus sensible.

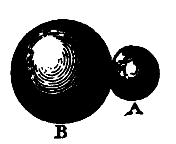


Fig. 169.

A partir de l'instant où les deux corps ont commencé à se toucher, ils se déforment de plus en plus, comme nous venons de le voir. Mais, en même temps, l'accélération de mouvement qui a été donnée aux premières molécules de B se transmet peu à peu à toute la masse du corps, et le ralentissement des molécules de A qui sont en avant se communique également peu à peu à toute la masse de cet autre corps : la vitesse de A diminue, et la vi-

tesse de B augmente. Tant que la vitesse du premier corps A, tout en diminuant, est plus grande que celle du second corps B, qui va en augmentant, la déformation continue à se produire, les corps s'aplatissent de plus en plus ; mais aussitôt que les vitesses des deux corps sont devenues égales, la déformation n'augmente plus. Dès lors il se passera des choses différentes, suivant la nature des deux corps qui se sont choqués.

En premier lieu, si les corps A et B sont tout à fait dépourvus d'élasticité, ils ne tendront en aucune manière à reprendre leurs formes primitives ; le choc sera terminé aussitôt qu'ils auront des vitesses égales, et, à partir de ce moment, ils se mouvront ensemble sans se séparer. C'est ce qui arrivera, par exemple, si les deux corps dont il s'agit sont deux balles de plomb.

En second lieu, si les corps A et B sont élastiques, si ce sont deux billes d'ivoire, par exemple, et que la déformation qu'ils ont éprouvée n'ait pas dépassé la limite de leur élasticité, le choc ne sera pas terminé à l'instant où leurs vitesses seront devenues égales. En effet, ces deux corps tendent à revenir à la forme qu'ils avaient avant le choc ; les molécules de chacun d'eux, qui avaient été refoulées vers leurs centres respectifs, s'en éloignent pour se replacer comme elles étaient d'abord, et les deux corps se repoussent. La vitesse du corps A continue donc à diminuer, celle du corps B continue donc à augmenter, et bientôt les deux corps se séparent, en s'éloignant de plus en plus l'un de l'autre. Les choses se passent comme si un ressort à boudin avait été placé entre les deux corps au moment du choc (fig. 170) : ce ressort, comprimé d'abord par l'excès de la vitesse du corps A sur le corps B, aurait cessé de se raccourcir lorsque les vitesses des deux corps seraient devenues égales ; puis en se détendant, il aurait éloigné les deux corps l'un de l'autre en augmentant toujours la vitesse de B et diminuant celle de A.

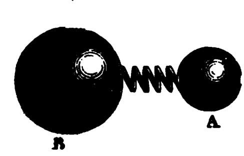


Fig. 170.

Pendant toute la durée du choc, la vitesse du corps B augmente constamment et conserve conséquemment le même sens : mais il n'en est pas toujours de même du corps A. Après la première partie du choc, c'est-à-dire à l'instant où les deux corps ont la même vitesse, cette vitesse est dirigée dans le même sens que les vitesses initiales des deux corps, la vitesse du corps A a diminué, sans changer de sens. Mais, pendant la seconde partie du choc, la vitesse de ce corps, qui diminue toujours, peut devenir

nulle, avant que le choc soit complétement terminé ; et le corps A, continuant à être repoussé du corps B par la réaction des molécules qui ont été déplacées, prendra un mouvement en sens contraire.

Des circonstances analogues à celle qu'on vient d'indiquer en détail se produiront dans le cas où les deux corps se meuvent en sens contraires, avant de se rencontrer ; et aussi dans les cas où un seul des deux corps est en mouvement avant le choc.

§ 118. Le changement que le choc apporte dans les vitesses des deux corps qui se sont rencontrés dépend de leurs masses respectives. A un instant quelconque, pendant que le choc se produit, il existe entre les deux corps une espèce de répulsion ; le corps B est soumis à une force qui tend à accélérer son mouvement, et le corps A à une force de sens opposé qui tend à ralentir le sien : ces deux forces sont égales et contraires, comme le seraient les pressions que les corps éprouveraient en même temps de la part d'un ressort à boudin qu'on aurait introduit entre eux. Mais ces deux forces, agissant sur des corps dont les masses sont généralement inégales, ne produiront pas sur chacun d'eux des changements égaux de vitesse. Nous avons vu (§ 95) que deux corps, sous l'action d'une même force, ou de deux forces égales, ce qui revient au même, acquièrent des vitesses inversement proportionnelles à leurs masses ; si nous supposons que la masse du corps B soit quatre fois plus grande que celle du corps A, pendant que la vitesse du corps B s'accroîtra de 1 décimètre par seconde, celle du corps A diminuera de 4 décimètres par seconde.

Admettons que, la masse du corps B étant toujours quatre fois plus grande que celle du corps A, la vitesse primitive de A soit de 15^m par seconde, et celle de B de 10^m par seconde. Par l'effet du choc, la vitesse du premier se réduira à 11^m par seconde, et la vitesse du second s'élèvera à cette valeur. A cet instant le choc sera terminé, si les corps sont dépourvus d'élasticité, et ils se mouvront ensemble avec leur vitesse commune de 11^m. Si les corps sont élastiques, et que la limite de l'élasticité n'ait pas été dépassée, ils reprendront exactement la forme qu'ils avaient d'abord, et il se développera par là, entre eux, des forces répulsives précisément égales à celles qui s'étaient développées pendant la première partie du choc. La vitesse du corps B augmentera donc encore de 1^m, et deviendra de 12^m par seconde ; tandis que celle du corps A éprouvera une nouvelle diminution, égale à celle qu'elle a déjà éprouvée, et se réduira à une vitesse de 7^m par seconde.

Admettons encore que, A et B ayant les mêmes masses que précédemment, la vitesse initiale de A soit de 7^m par seconde, et celle de B de 2^m par seconde. Après que les deux corps auront atteint leur plus grande déformation, ils auront une même vitesse de 3^m par seconde; la vitesse du premier aura diminué de 4^m par seconde; et celle du second aura augmenté de 1^m seulement. Si les corps sont élastiques, et que la limite de l'élasticité n'ait pas été dépassée, la vitesse du corps B augmentera encore de 1^m pendant la seconde partie du choc, et deviendra de 4^m par seconde. Mais la vitesse du corps A, qui a déjà diminué de 4^m, et a été ainsi réduite à 3^m par seconde, ne peut pas diminuer encore de 4^m : aussi sera-t-elle d'abord complétement détruite, puis le corps, reprenant un mouvement en sens contraire, acquerra dans ce sens une vitesse de 1^m par seconde.



Fig. 171.

Ces deux exemples doivent faire comprendre comment les vitesses des deux corps seront modifiées par le choc, dans les différents cas qui pourront se présenter.

§ 119. Des billes d'ivoire, présentant un grand degré d'élasticité, permettent de vérifier ce que nous venons de dire. Si l'on suspend d'abord deux billes égales à côté l'une de l'autre (fig. 17),

qu'on écarte l'une d'elles, A, de sa position d'équilibre, ıe le montre la 172, cette bille, tombant, vienboquer l'autre. stant où le choc ıence, la vitesse bille B est nulle; ɩurs, les masses ɩux billes étant êmes, la vitesse e par l'une d'elra égale à la viperdue en même par l'autre : à l'instant où ux billes seront us déformées, auront chacune vitesse la moitié vitesse qu'avait lle A au comement du choc.



Fig. 172.

ınt la seconde partie du choc, la vitesse de la bille B augera autant qu'elle a augmenté pendant la première partie ; t-dire qu'à la fin du choc, cette vitesse sera égale à la vitesse tive de la bille A ; dans le même temps, la vitesse de la bille A, était déjà réduite de moitié, diminuera encore d'autant, suite elle deviendra tout à fait nulle. On doit donc obsert l'on observe en effet, qu'aussitôt que le choc a eu lieu, e A reste immobile, et que la bille B, se mouvant sur un cercle, monte à une hauteur égale à celle dont on avait tomber la bille A. En s'élevant ainsi, la bille B finit par e complétement la vitesse qui lui avait été donnée par le elle redescend, sous l'action de la pesanteur, et vient choa bille A : alors elle s'arrête, la bille A remonte jusqu'au d'où on l'avait laissée tomber précédemment, et le mouvese continue ainsi indéfiniment, jusqu'à ce qu'il soit détruit s résistances provenant de l'air et du mode de suspension lles.

u lieu de deux billes, on en suspend un plus grand nombre l'une de l'autre, sept par exemple, et qu'on écarte la prede sa position d'équilibre (fig. 173), le choc qu'elle pro-

duira, en retombant, donnera lieu à un effet remarquable. D'après ce qu'on vient de voir, le choc de la première bille sur la seconde, s'il n'y en avait pas d'autres, ferait passer dans cette

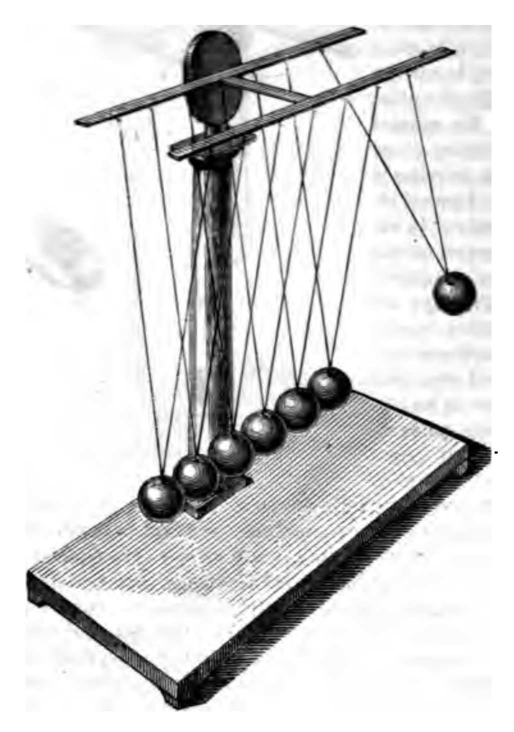


Fig. 173.

seconde bille toute la vitesse de la première, qui se trouverait par là réduite au repos ; admettons qu'il en soit encore ainsi. Dès lors la seconde bille, que ce premier choc fait passer brusquement de l'état de repos à l'état de mouvement, va choquer la troisième, et lui transmettre la totalité de sa vitesse. A la suite de ce second choc, la seconde bille se retrouvera donc en repos; elle n'aura été en mouvement que pendant l'intervalle de temps excessivement court qui sépare le premier choc du second. On

verrait de même que la vitesse passera de la troisième bille dans la quatrième; de la quatrième dans la cinquième; et qu'enfin elle sera transmise à la septième, qui, ne rencontrant pas d'obstacle à son mouvement, se mouvra en tournant autour de son point de suspension. C'est en effet ce qu'on observe : en laissant tomber la première bille d'une certaine hauteur, on la voit s'arrêter dès que le choc a eu lieu, et aussitôt la septième bille part, pour s'élever à la hauteur dont on avait laissé tomber la première. La dernière bille, en retombant, produit à son tour un choc, qui la réduit au repos, et qui met en même temps la première bille en mouvement, et ainsi de suite. Dans cette expérience, on voit les cinq billes intermédiaires rester immobiles; elles ne servent qu'à transmettre le mouvement de la première bille à la septième, et réciproquement : et ces deux billes extrêmes se meuvent, comme s'il n'y en avait pas d'autres entre elles.

Cette expérience fait voir, d'une manière bien positive, l'exactitude de ce que nous avons dit sur la communication successive du mouvement. Si, au moment où la première bille choque la seconde, le mouvement se communiquait instantanément aux six billes qui étaient en repos, les choses se passeraient de même que si la première bille venait en choquer une autre dont la masse fût six fois plus grande; et il est aisé de voir que la première bille ne pourrait pas rester immobile après un pareil choc. Au contraire, les choses se passent, dans le choc de la première bille contre la seconde, comme si ces deux billes étaient absolument seules; ce choc est terminé avant que le mouvement ait eu le temps de se transmettre jusqu'à la troisième bille.

Lorsqu'on laisse tomber verticalement une bille d'ivoire sur une table de marbre, dont la surface est horizontale, la bille rebondit, et s'élève à peu près à la hauteur dont elle était tombée. Pour se rendre compte de ce qui se passe, il faut observer que la table de marbre, qui est très-élastique, ne peut nullement céder à l'action du choc : elle doit être regardée comme absolument fixe. Au moment où le choc a lieu, la bille et la table se déforment; lorsque la déformation n'augmente plus, la bille et la table ont la même vitesse, c'est-à-dire une vitesse nulle, puisque la table est fixe. La bille ayant perdu toute sa vitesse dans la première partie du choc, reprendra, pendant la seconde partie, une vitesse en sens contraire, précisément égale à celle qu'elle avait.

La déformation que la bille et la table éprouvent au moment du choc, dans cette dernière expérience, peut être rendue sensible de la manière suivante. Il suffira de recouvrir la table

d'une couche d'huile extrêmement mince, et d'observer, après avoir laissé tomber la bille, la grandeur du cercle dans l'étendue duquel l'huile aura été touchée par la bille : ce cercle sera très-notablement plus grand que si l'on avait simplement posé la bille sur la table, sans produire de choc.

Si on laissait tomber, de la même manière, une balle de plomb sur une table recouverte de plomb, la balle s'arrêterait sur la table sans rebondir. La déformation, qui disparaît pendant la seconde partie du choc entre corps élastiques, persiste au contraire lorsque les corps qui se choquent sont dépourvus d'élasticité ; et, dans ce cas-ci, elle sera très-visible, tant sur la table que sur la balle.

§ 120. Lorsque deux corps viennent se choquer, leurs mouvements respectifs, avant le choc, ne sont pas toujours aussi simples que nous l'avons supposé dans les exemples précédents. Voyons comment on pourra, dans tous les cas, se rendre compte des diverses circonstances du choc. Soient A et B (fig. 171) les deux corps qui se choquent ; CD la vitesse du premier, et C'D' la vitesse du second, à l'instant où le choc commence ; *o* le point par lequel ils se touchent, et *mn* la ligne droite qui est dirigée perpendiculairement à leurs surfaces, au point *o*.

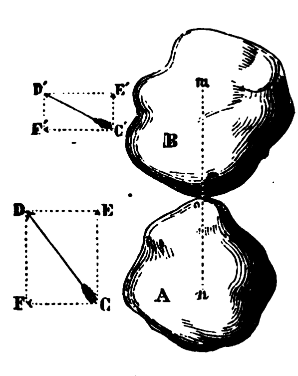


Fig. 171.

D'après ce que nous avons vu dans le § 104, le corps A peut être regardé comme animé à la fois de deux vitesses, dont l'une CE serait dirigée parallèlement à la ligne *mn*, et l'autre CF serait perpendiculaire à la précédente. De même on regardera le corps B comme animé d'une vitesse C'E' parallèle à *mn*, et d'une autre vitesse C'F' qui lui est perpendiculaire.

Si les corps A et B, à l'instant où ils commencent à se toucher au point *o*, étaient animés seulement des vitesses CF, C'F', ils ne feraient que glisser l'un sur l'autre, et il n'y aurait pas de choc. Le choc ne peut donc être dû qu'aux vitesses CE, C'E', et encore faut-il, pour cela, que la première soit plus grande que la seconde. En vertu de ces dernières vitesses, le choc se produira de la même manière que si elles existaient seules, et elles se trouve-

21. Lorsqu'une bille, en mouvement sur un billard, vient
encontrer une autre qui était immobile, il se produit
hoc ; nous allons voir dans quelles directions, et avec
es vitesses, les deux billes doivent se mouvoir après le

a première bille se meut suivant une ligne droite dirigée
e centre de la seconde, si elle vient la prendre *en plein*,
produira le même effet que dans le choc de deux billes
s, suspendues à côté l'une de l'autre, page 156 ; la pre-
bille cédera toute sa vitesse à la seconde, et restera im-
le.

is si la première bille rencontre la seconde de côté, comme
ntre la figure 175, où la ligne AB représente le chemin que
première bille vient de parcourir, les choses ne se passeront
le même. La vitesse BC de la première bille se décomposera
les deux vitesses BD et BE, dont l'une est dirigée suivant
ne des centres des deux bil-
c'est-à-dire suivant la per-
iculaire à leurs surfaces, au
où elles se touchent, et l'au-
iivant une ligne perpendi-
re à la précédente. Le choc
oduira en vertu de la vitesse
omme si elle était seule : et
ait que le résultat d'un pa-
hoc, entre deux billes éga-
'est de faire passer complé-
nt la vitesse BD de la première

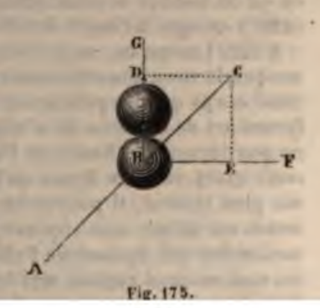


Fig. 175.

Supposons, en second lieu, qu'une bille qui se meut suivant la ligne AB (fig. 176) vienne rencontrer une des bandes du billard. On décomposera la vitesse BC de cette bille en deux composantes, l'une BD, dirigée perpendiculairement à la bande, l'autre BE parallèle à cette bande. Le choc aura lieu de même que si la composante BD existait seule. Comme la bande, qui est élastique, ne peut nullement céder au choc, la vitesse BD sera détruite pendant la première partie du choc; puis, dans la seconde partie, la bille reprendra, en sens contraire, une vitesse BD′ égale à la précédente. Pour trouver le mouvement que prendra la bille, au moment où elle quittera la bande, il faut donc composer la vitesse BE, qui n'a pas été modifiée, avec la vitesse BD′, et l'on trouvera la vitesse BC′, dont la bille sera animée définitivement; elle se mouvra suivant la direction de cette vitesse. On peut observer ici que l'angle C′BD′ est égal à l'angle CBD, à cause de l'égalité des triangles dont ils font partie; mais les angles CBD, ABD′, étant opposés par le sommet, sont égaux : donc les angles ABD′ et C′BD sont aussi égaux. C'est ce qu'on énonce ordinairement en disant que l'*angle d'incidence* (ABD′) *est égal à l'angle de réflexion* (C′BD′).

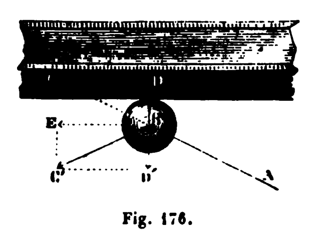


Fig. 176.

§ 122. Lorsqu'un corps vient en choquer un autre, nous avons vu que le mouvement ne se communique aux molécules du second corps que de proche en proche, et qu'il en résulte une déformation de ce corps. Si le choc est faible, la déformation pourra ne pas dépasser la limite de l'élasticité, et le corps reprendra ensuite exactement la figure qu'il avait auparavant. Mais si le choc est plus violent, il pourra en résulter une déformation permanente ou même une rupture; cela tient à ce que les premières molécules qui éprouvent l'effet du choc prennent brusquement un mouvement rapide, qui les écarte notablement de leur position d'équilibre avant que le mouvement se soit transmis aux molécules voisines. On conçoit par là que la vitesse plus ou moins grande, avec laquelle l'un des deux corps vient choquer l'autre, pourra donner lieu à des effets très-différents : c'est ce que quelques exemples feront bien comprendre.

Imaginons qu'une porte de bois ne soit retenue par rien qui puisse l'empêcher de tourner librement sur ses gonds. Si l'on prend un boulet, et qu'on le lance, avec les mains, contre cette

, il se produira un choc, qui fera tourner la porte, sans dé-ner de déformation bien sensible. Si, au contraire, le bou-ait lancé par un canon, il traverserait la porte, sans la faire er, en emportant avec lui seulement les parties qui étaient n passage ; les molécules soumises immédiatement à l'effet oc ont pris brusquement une telle vitesse, qu'elles se sont ıées des molécules voisines avant que le mouvement ait communiquer au de la porte.



Fig. 177.

balle de plomb lancerait légère-contre un carreau ıêtre serait renvoyée carreau, sans qu'il rupture. Si on la plus fortement avec in, elle traversera le au, en déterminant and nombre de fen-ui rayonneront tout r du trou par lequel elle aura passé. Mais si la balle est e par une arme à feu, elle ne fera dans le carreau qu'un rond par lequel elle passera; le reste du carreau sera in-

rsqu'un boulet de canon vient à traverser obliquement une de fer, de manière à rencontrer sur son chemin plusieurs aux, il se produit successivement divers chocs : les effets s chocs successifs ne sont pas les mêmes. La figure 177 re ce qui a lieu lorsque le boulet rencontre deux barreaux ment. Le premier qui se trouve sur son chemin est rompu omme du verre : les parties qui restent ne sont pas défor-. Il n'en est pas de même du second barreau : il a bien été u par le boulet, mais les parties restantes sont courbées le sens du mouvement. La vitesse du boulet, diminuée par ncontre du premier barreau, n'a pu produire sur le second ıoc aussi violent ; pendant l'action du boulet sur ce second au, le mouvement a eu le temps de se communiquer sur plus grande longueur, et c'est ce qui a déterminé la cour-des parties non enlevées.

23. L'effet produit dans un choc dépend aussi de la masse rps qui reçoit le choc. On conçoit que, plus le corps choqué une faible masse, plus il cédera facilement à l'action du ; s'il a une masse considérable, il cédera difficilement, et

il pourra en résulter une rupture dans la portion du corps qui a été choquée directement.

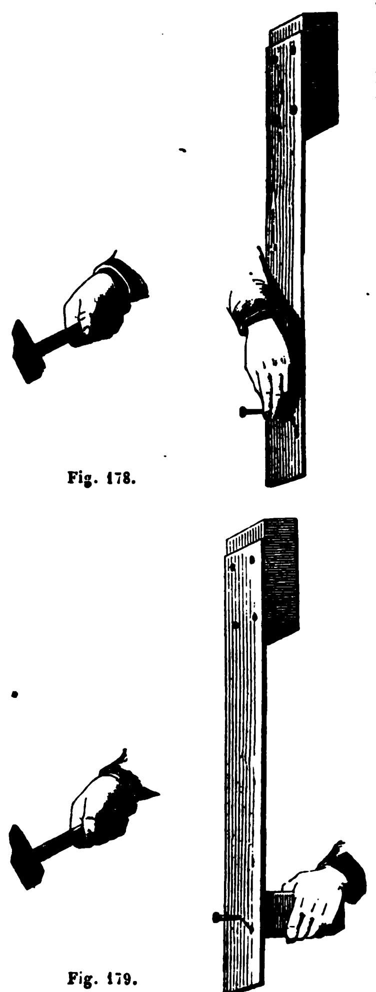


Fig. 178.

Fig. 179.

Lorsqu'on veut enfoncer un clou dans une planche mince, qui n'est appuyée sur rien (fig. 178), la planche fléchit à chaque coup de marteau, et le clou n'entre pas : le mouvement se communique trop facilement à toute la partie de la planche qui n'est pas appuyée. Mais le clou s'enfoncera si l'on vient à poser un morceau de bois derrière la planche (fig. 179), en le tenant avec la main, sans l'appuyer. Pour que la planche pût fléchir à chaque coup de marteau, il faudrait qu'elle entraînât le morceau de bois qui est placé derrière elle; ce mouvement, produit par une même force, ne peut pas être aussi rapide que si le morceau de bois n'y participait pas : aussi chaque coup de marteau donne-t-il lieu à une déformation de la planche, dans les points où le choc se transmet directement, et le clou s'enfonce. Dans cette opération, ce n'est pas une pression qu'il faut exercer du côté opposé à celui où l'on veut faire entrer le clou; mais c'est une masse qu'il faut placer de telle manière que, participant nécessairement au mouvement que prendra la planche, elle l'empêche de céder trop facilement à l'impulsion qu'elle reçoit.

DES RÉSISTANCES PASSIVES.

§ 124. Une machine est destinée à vaincre certaines résistances, telles que le poids des corps qu'elle doit élever, la cohésion des molécules des corps qu'elle doit pulvériser, etc. Mais, outre ces résistances *utiles*, en vue desquelles la machine est employée, il se produit toujours d'autres résistances, qui naissent de son mouvement, et qui, en s'opposant sans utilité à ce mouvement, neutralisent une portion plus ou moins grande de la force motrice. Ces résistances sont désignées, en général, sous le nom de *résistances passives*.

Les résistances passives sont de plusieurs espèces :

1° Lorsqu'on cherche à faire glisser un corps sur un autre, on éprouve une certaine résistance; il faut exercer un certain effort pour déterminer le glissement et aussi pour entretenir le mouvement, après l'avoir produit : cette résistance est appelée *résistance au glissement*, ou simplement *frottement*.

2° Lorsqu'on cherche à faire rouler un corps cylindrique sur une surface plane, on éprouve encore une certaine résistance ; elle se produit, par exemple, dans le roulement des roues de voiture sur le sol : c'est ce que l'on nomme la *résistance au roulement*.

3° Lorsque des cordes entrent dans la composition d'une machine, pour remplir convenablement leur objet, elles doivent présenter une flexibilité parfaite. Leur défaut de flexibilité donne lieu à des résistances qu'on désigne sous le nom de *roideur des cordes*.

4° Enfin, toutes les machines se meuvent, soit dans l'air, soit dans l'eau : les molécules d'air ou d'eau, qui se trouvent dans le voisinage des pièces mobiles, en reçoivent un mouvement qui ne peut être produit qu'aux dépens de la force motrice de la machine. C'est ce qui constitue la *résistance des fluides*.

Nous allons passer en revue successivement ces diverses espèces de résistances passives, et en indiquer les lois.

§ 125. **Frottement.** — Lorsqu'un corps pesant repose sur une surface plane et horizontale, sur une table, par exemple, et qu'on cherche à le faire glisser sur cette surface, on éprouve une résistance ; il existe, entre les molécules du corps et de la table, une adhérence qui s'oppose à leur séparation, et cette adhérence n'est vaincue que quand on applique au corps une force de traction suffisamment grande. La grandeur de cette force sert de mesure à la résistance qu'elle a vaincue.

Dès le moment que le corps dont on vient de parler a commencé à glisser, on a besoin, pour entretenir son mouvement sans que sa vitesse diminue, de lui appliquer constamment une certaine force de traction. Cette force est employée tout entière à vaincre le frottement qui se développe entre le corps et la surface sur laquelle il glisse ; elle peut, comme dans le cas précédent, servir de mesure à la résistance occasionnée par le glissement.

La force de traction qu'on a dû employer dans le premier cas n'est pas toujours la même que celle qu'on a appliquée au corps dans le second cas ; elle est souvent plus grande. On doit distinguer deux frottements différents : le frottement au départ, et le frottement pendant le mouvement. L'un et l'autre ont été l'objet de recherches expérimentales que nous allons indiquer.

§ 126. Pour déterminer les lois du frottement au départ, Coulomb s'est servi (en 1781) de l'appareil représenté par la figure 180. Une caisse A, qu'on chargeait de poids à volonté, pou-

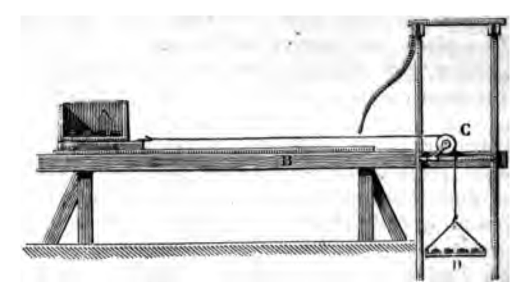


Fig. 180.

vait glisser sur deux madriers horizontaux B, placés à côté l'un de l'autre ; une corde attachée à la caisse passait dans la gorge d'une poulie C, descendait verticalement, et se terminait par un plateau D. Après avoir chargé la caisse A, il suffisait de mettre des poids dans le plateau D, en quantité convenable, pour que le mouvement commençât à se produire : les poids mis dans le plateau, augmentés du poids du plateau lui-même, étaient la mesure de la force de traction qui avait mis la caisse en mouvement, et par suite la mesure du frottement qui s'opposait à ce mouvement. On pouvait faire varier à volonté : 1° la charge de la caisse A ; 2° la nature des surfaces frottantes, en mettant sur les madriers, et fixant au-dessous de la caisse, les corps de diverses espèces

qu'on voulait soumettre à l'expérience ; 3° enfin la grandeur des surfaces frottantes, en faisant varier l'étendue de la surface par laquelle la caisse s'appuyait.

Le même appareil a servi à Coulomb pour étudier les lois du frottement pendant le mouvement. Mais dans ce cas, la détermination de la grandeur du frottement présentait plus de difficulté. Dès le moment que la caisse avait commencé à se déplacer, il fallait observer son mouvement, en reconnaître les lois, en mesurer la vitesse. Les moyens que Coulomb a employés pour cela manquaient de précision, et les lois du frottement qu'il a déduites de ses expériences n'étaient que très-imparfaitement démontrées.

En 1831, M. Morin a repris les expériences de Coulomb, pour les faire sur une plus grande échelle, et avec plus d'exactitude. Il a cherché de nouveau les lois du frottement au départ, et celles du frottement pendant le mouvement : mais c'est surtout en vue de ces dernières qu'il a entrepris son travail. A cet effet, il a remplacé les moyens que Coulomb avait employés, par des moyens beaucoup plus précis que nous allons indiquer.

La difficulté que présentent les recherches relatives au frottement pendant le mouvement consiste, comme nous l'avons déjà dit, à observer les lois du mouvement qui se produit sous l'action des poids placés dans le plateau D (fig. 180). Pour y arriver. M. Morin fixa à l'axe de la poulie C un large disque de cuivre E (fig. 181), qui devait tourner en même temps qu'elle : il suffisait évidemment d'étudier les lois du mouvement de ce disque, pour en conclure celles du mouvement de la corde, et aussi de la caisse A. Le disque fut, en conséquence, recouvert d'une feuille de papier, et un mécanisme d'horlogerie, qui pouvait donner un mouvement uniforme de rotation à un pinceau imbibé d'encre de Chine, fut disposé en avant du disque, de manière que la pointe du pinceau s'appuyât légèrement sur le papier, ainsi que le montre la figure 181. Si la caisse A restait immobile, et que le mécanisme d'horlogerie fît marcher le pinceau, il est bien clair qu'il tracerait une circonférence de cercle sur le disque E. Mais si la caisse A est en mouvement, qu'en conséquence le disque tourne, le pinceau, mû par le mécanisme d'horlogerie, ne décrira plus un cercle sur la surface du disque : il décrira une ligne courbe qui dépendra à la fois du mouvement du pinceau et de



Fig. 181.

celui du disque. Le mouvement du pinceau étant connu, on conçoit que la forme de cette ligne courbe devra faire connaître le mouvement du disque : c'est ce qu'on comprendra facilement si nous entrons dans quelques détails.

Soit ABC (fig. 182) la courbe tracée sur le disque par le pinceau, et Abc, le cercle que le pinceau y aurait tracé, si le disque n'avait pas été mis en mouvement. Nous supposerons que le pinceau, qui se meut uniformément, parcoure les arcs égaux Ab, bc....., chacun en une seconde. Le pinceau était au point A, lorsque le disque a commencé à se mouvoir. Au bout d'une seconde, le pinceau s'est trouvé en b; à ce moment il a marqué sur le disque, non pas le point b, mais le point B, qui est venu se placer sous sa pointe, en vertu de la rotation du disque : le disque a donc tourné de l'angle bOB pendant la première seconde. Au bout de deux secondes, le pinceau s'est trouvé en c; il a fallu qu'à ce moment le point C du disque vînt se placer en c, pour être marqué par le pinceau : donc, pendant les deux premières secondes, le disque a dû tourner de l'angle cOC. En continuant de la même manière, on trouvera les angles dont le disque a tourné pendant les trois premières secondes, pendant les quatre premières secondes, etc.



Fig. 182.

Dans toutes ses expériences, M. Morin a trouvé que les angles décrits par le disque, pendant la première seconde, pendant les deux premières secondes, pendant les trois premières secondes,... étaient entre eux comme les nombres 1, 4, 9,..., c'est-à-dire qu'ils étaient proportionnels aux carrés des temps employés à les décrire. Les chemins parcourus par la caisse A, pendant les mêmes intervalles de temps, étaient donc aussi proportionnels aux carrés de ces intervalles de temps; ou, en d'autres termes, le mouvement de la caisse A était de même nature que celui d'un corps qui tombe librement sous l'action de la pesanteur : c'était un mouvement uniformément accéléré (§ 87). L'angle dont le disque avait tourné pendant la première seconde faisait connaître la grandeur du chemin parcouru en même temps par la caisse;

le double de ce chemin était la vitesse acquise par la caisse, après une seconde de mouvement.

La force qui détermine le mouvement de la caisse A est le poids du plateau D et de ce qu'il contient; mais cette force est détruite en partie par le frottement qu'éprouve la caisse en glissant: la portion restante de cette force donne lieu à l'accélération du mouvement. Cette accélération se produisant uniformément, on en conclut que l'excès du poids du plateau D, avec ce qu'il contient, sur le frottement de la caisse, a toujours la même valeur: ce frottement reste donc le même pendant toute la durée du mouvement.

Pour trouver la grandeur du frottement, on observera que l'expérience fait connaître la vitesse acquise par la caisse A, après une seconde de mouvement, ainsi que nous l'avons dit il n'y a qu'un instant. On pourra trouver (§ 94) la grandeur de la force capable de donner cette vitesse au corps formé de la réunion de la caisse A et du plateau D: si l'on retranche cette force du poids du plateau D, la différence sera la valeur du frottement qu'éprouve la caisse A.

§ 127. La comparaison des résultats obtenus dans un grand nombre d'expériences a conduit M. Morin à admettre, comme entièrement exactes, les lois suivantes, données par Coulomb :

Le frottement pendant le mouvement est:

1° *Proportionnel à la pression qui s'exerce entre les deux corps qui frottent l'un sur l'autre;*
2° *Indépendant de l'étendue des surfaces de contact;*
3° *Indépendant de la vitesse du mouvement.*

Le frottement au départ est, de même:

1° *Proportionnel à la pression;*
2° *Indépendant de l'étendue des surfaces de contact.*

Le frottement au départ est le même que le frottement pendant le mouvement, lorsque les corps qui glissent l'un sur l'autre sont durs, comme les pierres et les métaux. Mais pour les corps compressibles, comme les bois, le frottement au départ est très-notablement plus grand que l'autre. Lorsqu'on pose l'un sur l'autre deux corps, dont un au moins est compressible, et qu'on cherche ensuite à les faire glisser, la résistance qu'on éprouve n'est pas toujours la même; elle varie, suivant que la durée du contact qui a précédé le glissement a été plus ou moins longue. Pour le glissement de bois sur bois, c'est après un contact de deux ou trois minutes que le frottement au départ atteint toute son intensité; pour le glissement de bois sur métaux, il faut un

temps beaucoup plus long, qui va même à plusieurs jours. Mais dès le moment que le contact des deux corps s'est suffisamment prolongé, le frottement au départ n'augmente plus avec la durée du contact.

Il peut paraître singulier que le frottement, soit au départ, soit pendant le mouvement, ne dépende pas de l'étendue des surfaces frottantes; il semble au contraire, au premier abord, qu'il devrait être proportionnel à cette étendue : mais un raisonnement bien simple va nous rendre compte de ce que l'expérience indique. Supposons que deux corps, de même poids, s'appuient sur un plan horizontal, par des surfaces de même nature et d'étendues différentes. La première sera, par exemple, double de la seconde. Lorsqu'on fera glisser ces deux corps sur le plan, le premier frottera par deux fois plus de points que le second. Mais aussi son poids se répartissant sur deux fois plus de points d'appui, on peut regarder les pressions qui en résultent, sur chacun de ces points, comme étant moitié moindres que les pressions correspondantes produites par le second corps; le frottement sera donc aussi moitié moindre en chaque point d'appui, et, en conséquence, si le nombre des points frottants est plus grand, le frottement, en chacun de ces points, est plus faible, dans le même rapport, et cela se compense exactement.

A égalité de pression, le frottement varie beaucoup, suivant la nature des surfaces qui glissent l'une sur l'autre. Voici quelques résultats d'expérience qui pourront donner une idée de la grandeur du frottement qui se développe dans les différents cas.

INDICATION DES SURFACES EN CONTACT.	RAPPORT du frottement à la pression au départ.	RAPPORT du frottement à la pression pendant le mouvement.
Bois sur bois, sans enduit, moyennement....	0,50	0,36
» avec enduit de savon sec.. *id.*	0,36	0,14
» avec enduit de suif....... *id.*	0,19	0,07
Bois sur métaux, sans enduit........ *id.*	0,60	0,42
» avec enduit de suif....... *id.*	0,12	0,08
Courroie sur bois, sans enduit......... *id.*	0,63	0,45
» mouillée d'eau........... *id.*	0,87	0,33
Métaux sur métaux, sans enduit....... *id.*	0,18	0,18
» avec enduit d'huile d'olive. *id.*	0,12	0,07

§ 128. **Résistance au roulement.** — Lorsqu'on cherche à faire rouler un corps cylindrique sur une surface plane et horizontale, on éprouve une résistance: cela provient de la déformation qu'éprouvent le corps et la surface sur laquelle il s'appuie, en raison de la pression qui s'exerce aux points de contact. Le cylindre s'aplatit, la surface qui le supporte se déprime en forme de sillon, et, pour produire le roulement, il faut, pour ainsi dire, à chaque instant, faire monter le cylindre sur un plan incliné.

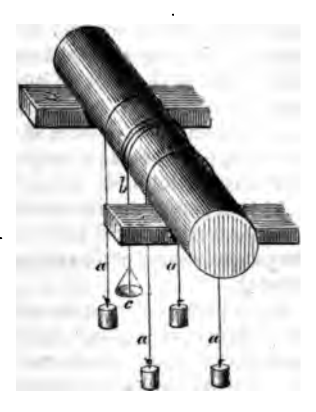


Fig. 183.

Coulomb a fait également des expériences pour déterminer les lois de cette résistance au roulement. Il s'est servi, pour cela, du moyen suivant. Deux madriers horizontaux, placés à côté l'un de l'autre, laissaient entre eux un espace vide, (fig. 183); un rouleau cylindrique était posé transversalement sur ces madriers, et la pression qu'il exerçait pouvait être augmentée à volonté, à l'aide de ficelles *a*, *a*, portant des poids égaux à leurs extrémités; enfin, une ficelle *b*, enroulée au milieu du rouleau, se terminait par un plateau *c*, dans lequel on pouvait mettre différents poids. Dans chaque expérience, Coulomb mettait dans le plateau *c* des poids suffisants pour produire le roulement : ces poids pouvaient servir de mesure à la résistance au roulement.

Pendant un temps très-court, on peut regarder le corps qui roule comme tournant autour de la ligne droite par laquelle il s'appuie. La résistance dont nous nous occupons s'oppose à ce que ce mouvement de rotation se produise, et le corps ne peut se mouvoir qu'autant que la force P (fig. 184) fait équilibre à cette résistance : on voit que la force P agit, pour cela, à l'extrémité du bras de levier AB. On pourrait faire l'expérience autrement, en remplaçant le poids P par

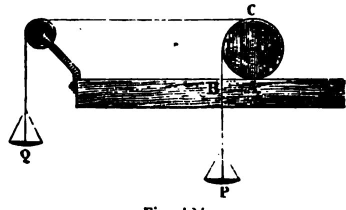


Fig. 184.

un poids Q qui tirerait le rouleau horizontalement au point C, à l'aide d'une corde passant sur une poulie : ce poids Q, agissant sur un bras de levier AC, qui est double de AB, devra n'être que la moitié de P, pour mettre le rouleau en mouvement, puisque la résistance à vaincre est la même dans les deux cas. Une force qui agirait sur un bras de levier autre que AB et AC, et qui ferait équilibre à la même résistance au roulement, aurait une valeur différente de P et de Q, qui dépendrait de la grandeur de son bras de levier. Il résulte des expériences de Coulomb que la force capable de vaincre la résistance au roulement, force que nous supposerons agir toujours sur un même bras de levier, est :

1° Proportionnelle à la pression ;

2° Indépendante du diamètre du rouleau.

Cette force varie d'ailleurs suivant la nature de la surface du corps qui roule, et de celle du plan sur lequel se produit le roulement.

Il est bien évident que, si la force qui détermine le roulement, au lieu d'agir toujours sur un même bras de levier, était dans tous les cas appliquée horizontalement au centre du rouleau, ou bien à l'extrémité supérieure de son diamètre vertical, elle serait inversement proportionnelle à ce diamètre.

§ 129. **Roideur des cordes.** — On peut se rendre compte de deux manières différentes de la résistance occasionnée par la roideur des cordes. Il est clair d'abord que cette résistance tient à ce que pour enrouler une corde sur une poulie ou sur un tambour, pour lui donner la courbure convenable à cet enroulement, il faut employer une certaine force; une portion de la puissance appliquée à la machine sert à produire cet effet, et est entièrement perdue, puisqu'elle ne peut vaincre aucune résistance utile. Mais on peut l'expliquer encore en observant que les deux brins de la corde ne sont pas exactement dans les mêmes conditions. Le brin qui s'enroule ne prend pas brusquement la courbure de la poulie ; il se courbe progressivement, et il en résulte que la portion de ce brin qui est encore rectiligne n'est pas dirigée suivant une tangente à la circonférence de la poulie (fig. 185). La direction de la force résistante, à laquelle la puissance doit faire équilibre, passe donc plus loin du centre de la poulie, que si la corde était parfaitement flexible; cette force

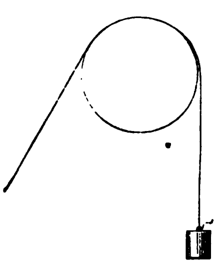


Fig. 185.

agit sur un plus grand bras de levier, et il en résulte que la puissance doit être plus grande qu'elle n'aurait été sans cela.

La portion de la puissance qui est absorbée par l'effet de la roideur d'une corde augmente en même temps que la tension de la corde ; mais elle n'augmente pas proportionnellement à cette tension. Elle varie d'ailleurs avec la nature et la grosseur de la corde.

Les courroies sans fin, qui passent sur des tambours, donnent lieu à des résistances du même genre.

§ 130. **Résistance des fluides.** — Lorsqu'un corps se meut dans un fluide, il éprouve, de la part de ce fluide, une résistance qui tend constamment à diminuer sa vitesse ; cela tient, comme nous l'avons déjà dit, à ce que le corps communique son mouvement aux molécules du fluide qu'il rencontre.

Si l'on compare cette résistance à celle qui est occasionnée par le frottement, on verra qu'elles sont essentiellement différentes l'une de l'autre. Lorsqu'on cherche à faire glisser un corps sur une surface, on éprouve une résistance avant que le glissement ait commencé ; cette résistance subsiste pendant le glissement, mais elle est très-souvent moindre qu'elle n'était d'abord, et elle ne varie pas d'ailleurs avec la vitesse du corps qui glisse.

Il n'en est pas de même de la résistance des fluides : tant que le corps qu'on considère n'est pas en mouvement, elle ne se fait pas sentir ; elle ne se développe que pendant le mouvement, et change beaucoup à mesure que le mouvement s'accélère.

Nous reviendrons plus tard sur cette résistance que les fluides opposent aux corps qui se meuvent à leur intérieur ; pour le moment, nous nous contenterons de dire qu'elle est proportionnelle : 1° à l'étendue de la surface qui vient directement choquer les molécules fluides ; 2° au carré de la vitesse avec laquelle ce choc se produit. Elle est d'ailleurs beaucoup plus grande dans l'eau que dans l'air.

Avec le petit appareil représenté par la figure 186, on peut montrer que la résistance des fluides croît, en effet, lorsqu'on augmente l'étendue de la surface qui rencontre directement les molécules liquides ou gazeuses. Deux petites roues A, B, sont montées chacune sur un axe particulier, et sont extrêmement mobiles autour de ces deux axes. Deux crémaillères, fixées l'une à l'autre, engrènent avec deux pignons de mêmes dimensions, que portent les axes des deux roues : en sorte que, si l'on abaisse rapidement les deux crémaillères, en agissant comme l'indique la figure 186, jusqu'à ce qu'elles n'engrènent plus avec les pignons, qui pourront tourner librement dans les échancrures C, C,

on communique aux deux petites roues exactement la même vitesse de rotation. Chacune des deux roues est formée de quatre ailettes. Dans la roue A, les ailettes sont fixées à l'axe, et vien-

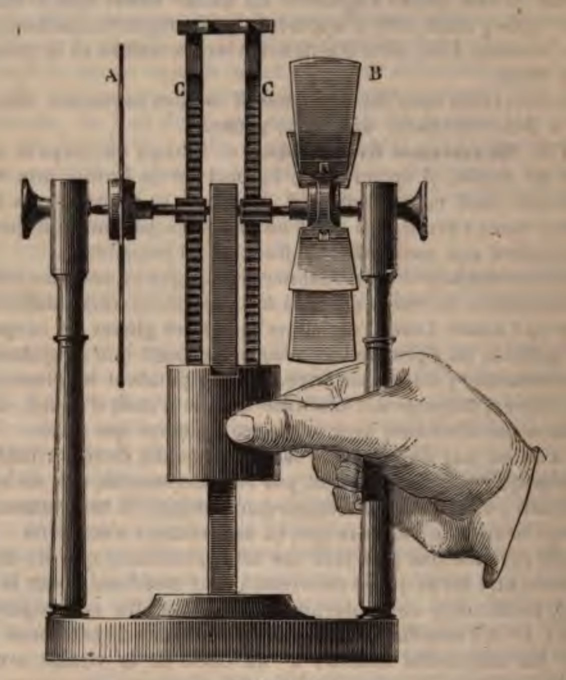


Fig. 186.

nent rencontrer l'air seulement par leur tranche. Dans la roue B, au contraire, les ailettes sont mobiles ; elle peuvent être placées de la même manière que celles de la roue A, ou bien être inclinées plus ou moins sur la direction du mouvement ; elles peuvent même être disposées de manière à rencontrer l'air de face, pendant qu'elles tourneront. Lorsque les ailettes de la roue B sont mises dans la même position que celles de la roue A, et qu'on fait tourner les deux roues à l'aide des crémaillères, on les voit se mouvoir pendant un temps très-long, et s'arrêter à très-peu près l'une comme l'autre ; mais si les ailettes de la roue B sont disposées autrement, comme dans la figure 186, le mouve-

ment de cette roue se ralentit bien plus vite que celui de l'autre roue, et ce ralentissement est d'autant plus marqué, que les ailettes se rapprochent plus de rencontrer de face les molécules d'air qui sont sur leur passage.

ÉTUDE DES MACHINES A L'ÉTAT DE MOUVEMENT NON UNIFORME.

§ 131. Lorsqu'une machine est en mouvement, et qu'elle est soumise à des puissances et des résistances qui se font équilibre, son mouvement est uniforme. Mais il en est rarement ainsi, il y a même des machines, en grand nombre, pour lesquelles cela ne peut jamais avoir lieu ; c'est ce que l'on comprendra aisément à l'aide de l'exemple suivant.

On emploie souvent, pour faire tourner une meule à aiguiser, la disposition représentée sur la figure 187. L'axe de la meule se termine par une manivelle ; de l'extrémité de la manivelle part une *bielle*, qui descend à peu près verticalement, et dont la partie inférieure se relie à l'extrémité d'une *pédale*. La bielle est articulée d'une part avec la manivelle, d'une autre part avec la pédale. Si l'on fait tourner la meule, en agissant directement sur elle avec la main, on verra la manivelle tourner, la bielle montera et descendra alternativement, en s'inclinant tantôt d'un côté tantôt de l'autre de la verticale ; et la pédale, tournant autour d'une de ses extrémités, s'élèvera et s'abaissera successivement. Le rémouleur, qui se sert de cette meule, entretient le mouvement en posant un pied sur la pédale, et l'appuyant au moment où la bielle descend ; lorsque la bielle remonte, il ne retire pas son pied, mais il le soutient, pour qu'il n'exerce pas de pression sur la pédale. En même temps qu'il entretient ainsi le mouvement de la meule, il appuie sur sa surface le corps tranchant qu'il veut aiguiser.

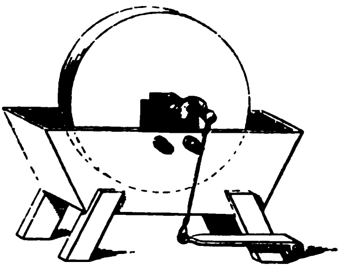


Fig. 187.

Il est aisé de reconnaître qu'un pareil mouvement ne peut pas être uniforme. Si l'on examine ce qui se passe pendant un tour entier de la meule, en commençant à l'instant où la pédale occupe sa position la plus élevée, on verra que le pied n'agit que pendant la première moitié de ce tour, et qu'il cesse complète-

ment d'agir pendant la seconde moitié. La résistance, au contraire, qui est occasionnée par le frottement du corps qu'on aiguise, continue son action d'une manière à peu près régulière pendant le tour entier. Ainsi, dans la seconde moitié du tour, il ne peut pas y avoir équilibre entre la puissance et la résistance, puisque la puissance est nulle, et que la résistance ne l'est pas. Dans la première moitié du tour, cet équilibre n'existe qu'à deux instants particuliers, comme nous allons le voir.



Fig. 188.

Lorsque la meule tourne, l'extrémité M de la manivelle OM (fig. 188) décrit une circonférence de cercle; la bielle MN, prolongée idéalement, si cela est nécessaire, passe tantôt à droite, tantôt à gauche du point O, centre de ce cercle. Pendant que la pédale descend, la bielle reste d'un même côté du centre; mais sa distance OP à ce point, distance qui n'est autre chose que le bras de levier sur lequel agit la puissance, varie d'un moment à l'autre. Ce bras de levier, nul d'abord, lorsque la bielle commence à descendre, augmente jusqu'à devenir égal à OM; puis il diminue, et redevient nul lorsque la bielle est sur le point de remonter. La puissance, agissant sur un bras de levier qui varie à chaque instant, ne peut pas faire constamment équilibre à la résistance. Mais si ce bras de levier, pendant qu'il augmente, atteint une valeur pour laquelle l'équilibre a lieu, il repassera par la même valeur lorsqu'il diminuera; en sorte que la puissance fera deux fois équilibre à la résistance, pendant le mouvement descendant de la bielle, qui occupera, à ces deux instants, des positions telles que MN, M'N' (fig. 188).

Tant que l'extrémité de la manivelle est située entre le point M et le point M', la puissance agit sur un bras de levier plus grand que celui qui convient à l'équilibre; une portion de la puissance suffit pour vaincre la résistance, et l'autre portion donne lieu à une accélération du mouvement de la meule. Mais si, pendant que la bielle descend, l'extrémité de la manivelle se trouve au-dessus du point M, ou au-dessous du point M', la puissance, ayant un bras de levier trop faible, ne peut plus faire équilibre qu'à une portion de la résistance; l'autre portion ralentit le mouve-

ment. Pendant que la bielle remonte, le mouvement se ralentit aussi constamment, puisque la meule n'est plus soumise qu'à la résistance. On voit donc que la vitesse de la meule augmente pendant tout le temps que la manivelle met à aller de M en M', et qu'elle diminue pendant que la manivelle achève son tour, en allant de M' en M. La meule a sa plus petite vitesse lorsque la manivelle est en M, et sa plus grande vitesse lorsqu'elle est en M'.

§ 132. Il y a beaucoup d'ateliers dans lesquels une même machine motrice, une machine à vapeur, par exemple, fait mouvoir un grand nombre de machines-outils, telles que des scies, des machines à raboter, à percer, etc. Habituellement ces machines-outils ne fonctionnent pas toutes à la fois. Elles reçoivent leur mouvement de la machine motrice par l'intermédiaire des courroies sans fin, dont nous avons parlé au § 57; et la communication du mouvement s'établit et se supprime à volonté, pendant la marche de la machine motrice, à l'aide du mécanisme dont nous avons indiqué le principe dans ce paragraphe. Dans le cours d'une journée, le nombre des machines-outils qui travaillent, change très-souvent; chacune d'elles s'arrête et se remet en marche successivement plusieurs fois. On voit par là que la machine motrice a à vaincre des résistances qui varient souvent, et qui peuvent même varier d'une manière très-considérable; en sorte que ce n'est qu'accidentellement qu'il peut y avoir équilibre entre la puissance et les résistances. Lorsque la puissance est trop grande pour qu'il y ait équilibre, le mouvement s'accélère dans toutes les parties de l'atelier qui communiquent avec cette puissance; le mouvement se ralentit au contraire, lorsque la puissance est trop faible relativement aux résistances qu'elle a à vaincre.

§ 133. **Des volants.** — Il est important, dans la plupart des cas, de régulariser autant que possible le mouvement des machines, afin que la vitesse de chaque pièce n'augmente pas, ou ne diminue pas, au delà de certaines limites. Voici comment on y parvient.

Le mouvement d'une machine s'accélère, lorsque la puissance l'emporte sur les résistances à vaincre. Mais l'accélération produite par un même excès de puissance peut être très-différente, suivant la grandeur et la disposition des pièces qui y participent. Si l'on fixe à la machine des corps massifs qui doivent se mouvoir avec elle, et si on les dispose surtout de telle manière qu'ils aient habituellement une grande vitesse, on rendra la machine beaucoup moins sensible à l'action de toute

force accélératrice. La quantité de mouvement produite par cette force devant se répartir entre toutes les pièces qui se meuvent ensemble, chacune d'elles en recevra une portion d'autant plus faible qu'on aura donné plus d'importance à ces masses additionnelles. La présence de pareilles masses aura donc pour effet de diminuer l'accélération de mouvement qui doit résulter de l'excès de la puissance sur les résistances.



Fig. 189.

De même, si la puissance vient à être trop faible pour faire équilibre aux résistances, l'excès de ces dernières ralentira le mouvement de la machine: mais ce ralentissement se fera beaucoup moins sentir, lorsque la machine sera munie des masses additionnellrs dont on vient de parler.

On donne ordinairement à ces masses additionnelles la forme d'une roue, comme celle qui est ici représentée (fig. 189). Cette roue, montée sur un arbre tournant, participe au mouvement de rotation de l'arbre; pour une même vitesse angulaire, les molécules qui sont à la circonférence ont un mouvement d'autant plus rapide que la roue a un plus grand diamètre. Une pareille roue prend le nom de *volant*.

Quelquefois, au lieu d'une roue, on adapte à l'un des arbres tournants de la machine deux ou trois rayons terminés par des masses de fonte (fig. 190 et 191). On donne à ces masses la forme de lentille pour diminuer la résistance que l'air oppose à leur mouvement, résistance qui pourrait être très-grande en raison de la grandeur de leur vitesse. Ces masses lenticulaires sont d'ailleurs disposées de telle manière que le centre de gravité de l'espèce de volant qu'elles forment soit situé sur l'axe de rotation de l'arbre.

L'addition d'un volant à une machine ne nécessite pas l'em-

es peut va-
la vitesse
machine,
nt que la
ance l'em-
ra sur les
ances, ou
sement.
ur être ex-
nent dans
rai, nous
ns dire ce-
ant que,
d on adap-
volant à
rbre tour-
, le poids

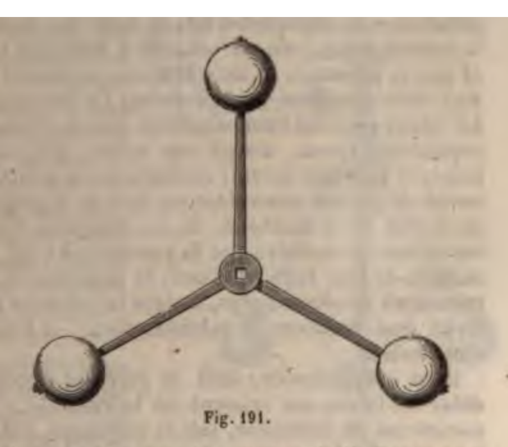


Fig. 191.

olant détermine une plus grande pression de l'arbre sur ses
orts; il en résulte donc des frottements plus grands que si
olant n'existait pas, et la puissance qui est appliquée à la
ine doit être augmentée en conséquence, pour pouvoir
cre ces frottements. C'est pour cette raison seulement que
ition d'un volant à une machine nécessite l'emploi d'une
grande puissance; mais l'augmentation qui en résulte est
ment faible, qu'on peut la négliger.
peut augmenter la puissance d'un volant, soit en augmen-
son poids, sans changer sa forme, soit en lui donnant de plus
des dimensions sans faire entrer plus de matière dans sa

ne présenterait plus une solidité suffisante, et pourrait être brisée par la force centrifuge qui se développe pendant son mouvement de rotation (§ 111).

§ 134. **Régulateur à force centrifuge.** — Un volant régularise le mouvement d'une machine, en empêchant que les inégalités qui arrivent dans l'action de la puissance et des résistances ne produisent une trop grande accélération, ou un trop grand ralentissement de la vitesse; mais il y a beaucoup de circonstances dans lesquelles cela ne suffit pas. Si les résistances que la machine doit vaincre venaient à diminuer très-notablement, et que la puissance se trouvât à chaque instant trop grande pour leur faire équilibre, le mouvement s'accélérerait constamment. Le volant pourrait bien empêcher que la vitesse ne s'accrût trop rapidement; mais, malgré son action, elle augmenterait sans cesse, et pourrait devenir excessivement grande, ce qui entraînerait de grands inconvénients, dont le moindre serait de nuire au travail de la machine. Si, au contraire, les résistances augmentaient de manière que la puissance ne fût, à aucun instant, capable de leur faire équilibre, le mouvement de la machine se ralentirait de plus en plus, malgré la présence du volant, qui ne ferait que modérer ce ralentissement, et bientôt la machine s'arrêterait.

Il est indispensable, dans de pareilles circonstances, de modifier les forces qui agissent sur la machine, c'est-à-dire d'augmenter ou de diminuer, soit la puissance, soit les résistances à vaincre, afin de ramener le mouvement à un état normal. On ne peut pas, ainsi que nous l'avons vu (§§ 131 et 132), faire en sorte qu'il y ait constamment équilibre entre la puissance et les résistances; mais on doit tâcher de régler les diverses forces de manière que, le mouvement s'accélérant et se ralentissant successivement, la vitesse ne s'éloigne jamais beaucoup de celle qui convient au meilleur travail de la machine. Pour atteindre ce but, on emploie avec beaucoup d'avantage le *régulateur à force centrifuge*, (fig. 192).

Il se compose essentiellement de deux boules métalliques fixées aux extrémités de deux tiges AB, AC. Ces tiges sont attachées, en A, à un arbre vertical AD, auquel la machine communique un mouvement de rotation; elles peuvent d'ailleurs tourner autour de leurs points d'attache, de manière à faire des angles plus ou moins grands avec l'arbre AD. Deux autres tiges sont articulées, d'une part en B et C aux deux précédentes, et d'une autre part à un anneau D qui enveloppe l'arbre vertical, et peut monter ou descendre librement le long de cet arbre. Si l'on

écarte les deux boules l'une de l'autre, avec les mains, le losange ABDC se déforme, sa diagonale AD se raccourcit, et en conséquence l'anneau D monte : cet anneau D s'abaisserait, au contraire, si, au lieu d'écarter les deux boules, on les rapprochait l'une de l'autre.

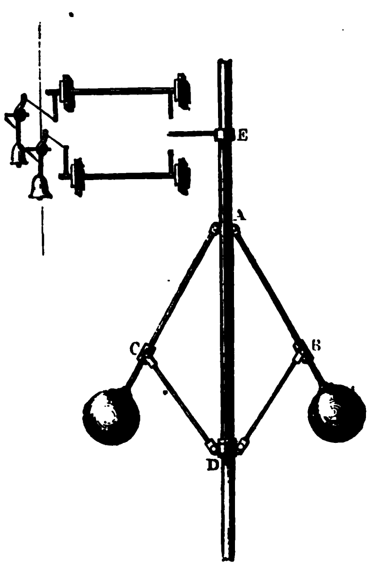


Fig. 192.

L'arbre vertical recevant un mouvement de rotation de la machine à laquelle le régulateur est adapté, les deux boules tournent en même temps. Chacune d'elles est soumise à son poids et à la force centrifuge développée par le mouvement de rotation ; elle s'écarte de l'arbre tournant, jusqu'à ce que la résultante de ces deux forces soit dirigée suivant le prolongement de la tige à laquelle elle est fixée. Si le mouvement de la machine s'accélère, les boules tourneront plus vite ; la force centrifuge augmentera, et les boules s'écarteront. Elles se rapprocheront, si le mouvement de la machine se ralentit. Il en résulte que l'anneau D montera ou descendra, suivant que la rapidité du mouvement de la machine sera plus ou moins grande. C'est ce mouvement ascendant ou descendant de l'anneau D qu'on met à profit, pour agir, soit sur la puissance, soit sur les résistances.

Dans certains cas, le régulateur agit de lui-même sur la puissance qui fait mouvoir la machine, en diminuant sa grandeur lorsque le mouvement est trop rapide, et l'augmentant lorsque la vitesse est trop faible; c'est ce qui a lieu notamment dans les machines à vapeur, comme nous le verrons plus tard. Dans d'autres cas, le régulateur ne fait que prévenir l'ouvrier qui dirige la marche de la machine, en lui indiquant si le mouvement est trop rapide ou trop lent ; cet ouvrier peut alors modifier la grandeur de la puissance, et la mettre en rapport avec les résistances à vaincre, de manière à maintenir la vitesse entre les

limites dont elle ne doit pas sortir. La figure 192 montre une disposition qui est employée dans les moulins à farine, et qui est destinée à produire l'effet dont nous venons de parler en dernier lieu. L'anneau D est surmonté de deux tringles verticales, dont une seule est visible sur la figure, et qui se terminent à l'anneau E. Ce second anneau, se trouvant ainsi lié au premier, en suivra tous les mouvements ; il s'élèvera ou s'abaissera, suivant que le mouvement de la machine sera trop rapide ou trop lent. Cet anneau E, qui tourne en même temps que le régulateur, porte un doigt horizontal placé de manière à ne rien rencontrer dans son mouvement, tant que la machine marche avec une vitesse convenable ; mais dès que la vitesse de la machine devient trop grande ou trop petite, ce doigt vient, à chaque tour, choquer un petit levier qui fait sonner une sonnette. Les deux sonnettes, dont l'une sert quand la machine va trop vite, et l'autre quand elle va trop lentement, ont des timbres différents, afin qu'on puisse distinguer tout de suite dans quel sens on doit modifier la grandeur de la puissance qui fait mouvoir la machine.

§ 135. **Transmission du travail dans une machine.** — Nous avons vu précédemment (§ 81), que lorsqu'une machine est animée d'un mouvement uniforme, le travail moteur et le travail résistant, produits pendant un même intervalle de temps, sont égaux entre eux. Il ne peut plus en être de même, dans le cas où la vitesse de la machine change à chaque instant.

Pour que le mouvement s'accélère, il faut que la puissance l'emporte sur les résistances; une partie seulement de la puissance leur fait équilibre, et l'autre partie augmente la vitesse de la machine. Le travail moteur produit par la première partie est égal au travail résistant total, puisque, si elle existait seule, le mouvement serait uniforme. On voit donc que le travail moteur dû à la puissance tout entière surpasse le travail résistant total de tout le travail que produit la seconde partie de la puissance.

Pour que le mouvement se ralentisse, il faut que les résistances l'emportent sur la puissance. Celle-ci ne fait plus équilibre qu'à une portion des résistances, et le travail moteur est égal au travail résistant dû à cette portion seulement. Le travail résistant total surpasse donc le travail moteur de toute la quantité de travail correspondant à la portion excédante des résistances.

Ainsi le travail moteur est tantôt plus grand, tantôt plus petit que le travail résistant produit pendant le même temps, suivant que le mouvement de la machine s'accélère ou se ralentit. Mais,

de plus, on admettra sans peine que l'excès de travail moteur, qui donne lieu à une certaine accélération du mouvement, est précisément égal à l'excès de travail résistant qui détruit cette accélération, en ramenant le mouvement à ce qu'il était primitivement. On voit, en effet, que si une force, appliquée à une machine, et n'ayant aucune résistance à vaincre, produisait une certaine augmentation de vitesse, il suffirait d'appliquer ensuite cette force en sens contraire, pendant le même temps, ou bien d'autres forces dont l'ensemble lui serait équivalent, pour que la vitesse se trouvât réduite à ce qu'elle était d'abord ; et il est clair que le travail moteur développé dans le premier cas est égal au travail résistant développé dans le second, puisque si ces forces agissaient simultanément sur la machine, elles se feraient équilibre. On peut donc dire que, lorsqu'une machine se trouve, à deux instants différents, animée de la même vitesse, quels que soient les changements que sa vitesse a pu éprouver dans l'intervalle, il y a eu compensation exacte entre les excès alternatifs du travail moteur et du travail résistant ; en sorte que le travail moteur total, produit pendant tout cet intervalle de temps, est égal au travail résistant total produit pendant le même intervalle de temps. Cela aura lieu encore, si l'on prend la machine depuis l'instant où elle commence à se mouvoir jusqu'à celui où elle rentre à l'état de repos.

Habituellement, lorsqu'une machine ne peut pas, par sa nature, prendre un mouvement uniforme, comme la meule de rémouleur (§ 131), elle prend un mouvement qu'on appelle *régulier* ou *périodiquement uniforme* ; les accélérations et les ralentissements du mouvement se succèdent périodiquement, de manière que, lorsque les diverses pièces de la machine repassent par les mêmes positions, elles y sont animées des mêmes vitesses. C'est ce qui a lieu pour la meule de rémouleur, lorsqu'il s'est déjà écoulé quelque temps depuis qu'elle a été mise en mouvement ; à la fin de chaque tour qu'elle fait, elle reprend la vitesse qu'elle avait au commencement de ce tour. Dans un pareil cas, l'égalité du travail moteur et du travail résistant a lieu pendant chacune des périodes du mouvement.

Si l'on considère le temps qui s'écoule, depuis le moment où la machine commence à marcher, jusqu'au moment où son mouvement est devenu régulier, on trouvera que le travail moteur est plus grand que le travail résistant ; l'excès du premier sur le second a été employé à donner à la machine le mouvement qu'elle possède à la fin de cet intervalle de temps. Pendant tout le temps de la marche régulière de la machine, le travail

moteur sera précisément égal au travail résistant. Mais, lorsque la machine quittera son mouvement régulier pour passer à l'état de repos, le travail résistant deviendra plus grand que le travail moteur, et il le surpassera de toute la quantité dont il en avait été surpassé pendant la première partie de la marche de la machine, en sorte que, comme nous l'avons déjà dit, le travail moteur, produit pendant toute la durée du mouvement, est égal au travail résistant correspondant.

§ 136. **Effets des volants.** — Toutes les fois que le travail moteur est plus grand que le travail résistant, l'excès du premier sur le second se transforme en mouvement, et il y a accélération dans la vitesse de la machine; c'est pour que cette accélération ne devienne pas trop grande qu'on emploie les volants. Mais si un volant diminue l'accroissement de la vitesse, il ne diminue pas pour cela l'effet que peut produire cet accroissement. Le surcroît de mouvement, qui est occasionné par la prépondérance du travail moteur sur le travail résistant, se répartit sur une plus grande masse que si le volant n'existait pas, et c'est ce qui fait que la vitesse ne change pas autant; mais ce surcroît de mouvement, qui s'accumule en grande partie dans la masse du volant, sans que la vitesse de la machine en soit bien sensiblement modifiée, n'en est pas moins capable de donner lieu à la production de la même quantité de travail résistant. Sous ce point de vue, on peut dire qu'*un volant est un réservoir de travail.* Lorsque le travail moteur l'emporte sur le travail résistant, l'excès du premier sur le second s'emmagasine dans le volant, sous forme de mouvement ; et lorsque l'occasion s'en présente, ce travail, mis en réserve, donne lieu à la production d'une quantité égale de travail résistant.

Si une machine est munie d'un volant, il faudra une plus grande force pour la mettre en mouvement, et lui faire acquérir une vitesse convenable, que si le volant n'existait pas; l'excès du travail moteur sur le travail résistant, pendant les commencements de la marche de la machine, doit être plus grand qu'il n'aurait été sans cela. Mais nous avons vu que cet excès de travail moteur n'est pas perdu; il est utilisé dans les derniers moments de la marche de la machine, et donne toujours lieu à la production d'une quantité égale de travail résistant.

§ 137. **Influence des résistances passives.** — Dans tout ce que nous avons dit jusqu'ici, relativement aux machines, nous avons toujours fait abstraction des frottements entre les diverses pièces, et en général de ce que nous avons appelé les *résistances passives* (§ 124). Les résultats que nous avons obtenus

ont donc besoin d'être complétés, sous ce rapport, pour ne rien laisser à désirer. Or, ce complément est bien simple : il suffit, en effet, de regarder les résistances passives comme faisant partie des résistances qui doivent être vaincues par la puissance, et tout ce qui a été trouvé précédemment devient entièrement exact.

En étudiant diverses machines, sous le point de vue de l'équilibre des forces qui leur sont appliquées, nous avons vu comment, dans chaque cas, on pouvait trouver la grandeur de la puissance capable de faire équilibre à la résistance. Pour évaluer exactement cette puissance, on devra tenir compte, non-seulement de la résistance, que la machine est destinée à vaincre, mais encore des résistances passives de toute espèce occasionnées par l'emploi de cette machine : la puissance nécessaire pour que la machine soit à l'état d'équilibre sera donc toujours plus grande que si ces résistances passives n'existaient pas.

En considérant les machines à l'état de mouvement uniforme, nous avons reconnu que le travail moteur était toujours égal au travail résistant. Nous sommes arrivés au même résultat, dans le cas du mouvement non uniforme d'une machine, à la condition d'évaluer les quantités de travail pendant un intervalle de temps, au commencement et à la fin duquel la machine se trouve animée d'une même vitesse. Cette égalité du travail moteur et du travail résistant subsistera encore, quand nous ne négligerons plus les résistances passives, pourvu qu'en évaluant le travail résistant, nous y comprenions celui qui correspond à ces résistances passives.

Les résistances qu'on doit considérer dans l'étude d'une machine en mouvement sont donc de deux espèces : les unes sont les résistances utiles, celles que la machine a pour objet de vaincre ; les autres sont les résistances passives. La portion du travail résistant total qui correspond aux premières prend le nom de *travail utile* ; et le principe de la transmission du travail s'énonce de la manière suivante : *Le travail moteur est égal au travail utile, augmenté du travail dû aux résistances passives.*

Il est en général très-facile, comme nous l'avons vu dans les paragraphes 52 à 66, de trouver la grandeur de la puissance capable de faire équilibre à une résistance donnée, par l'intermédiaire d'une machine, quand on ne tient pas compte des résistances passives ; mais il n'en est plus de même lorsqu'on veut en tenir compte. Ces résistances passives sont habituellement difficiles à évaluer. Celles qui présentent le moins de difficultés sous ce rapport, et qui ont en même temps une plus

grande influence que les autres, surtout lorsque la machine n'est pas animée d'une trop grand vitesse, ce sont les frottements. Les expériences nombreuses qui ont été faites pour en déterminer les lois et la grandeur permettent de les évaluer assez exactement: cependant il reste toujours quelque incertitude sur leur grandeur, en raison de ce que les surfaces des corps qui frottent ne sont pas identiquement les mêmes que celles qu'on a soumises à l'expérience, et aussi en raison de ce que les pressions qui les occasionnent ne peuvent pas toujours être complétement connues. Mais les forces de frottement, dont on doit tenir compte dans une machine, sont ordinairement assez nombreuses; elles se développent entre les dents des engrenages, entre les tourillons des arbres tournants et les coussinets qui les supportent, etc. En sorte que, si l'on veut calculer la grandeur de la portion de la puissance qui fait équilibre à toutes ces forces de frottement, on est entraîné dans une grande complication. D'ailleurs, outre les frottements, il existe encore d'autres résistances passives auxquelles la machine est soumise, et qui ne peuvent, la plupart du temps, être calculées qu'avec une grossière approximation. On voit donc qu'on ne doit pas espérer de déterminer exactement la grandeur de la puissance capable de faire équilibre à toutes ces résistances, à moins que la machine ne soit d'une grande simplicité.

Par la même raison, il sera très-difficile de calculer exactement la quantité de travail résistant occasionnée par les diverses résistances passives, pendant un intervalle de temps quelconque, afin de voir de combien le travail moteur surpasse le travail utile, pendant ce temps.

On devra donc se contenter de savoir que pour vaincre une même résistance utile, il faudra une puissance d'autant plus grande, que les résistances passives auront une plus grande influence; que pour produire une même quantité de travail utile, il faudra développer une quantité de travail moteur d'autant plus considérable, que le travail dû aux résistances passives sera plus grand. Dans la construction d'une machine, on devra toujours se proposer de diminuer autant qu'on pourra l'influence des résistances passives, afin d'employer la plus petite quantité possible de travail moteur, à la production d'une quantité donnée de travail utile. Sous le point de vue de l'économie des forces, la perfection d'une machine consistera dans la grandeur du rapport qui existera entre le travail utile et le travail moteur; ce rapport, qui constitue ce qu'on nomme le *rendement* de la machine, est toujours inférieur à l'unité: mais

la machine sera d'autant plus parfaite, qu'il approchera davantage d'être égal à 1.

§ 138. **Moyens de diminuer l'influence des résistances passives.** — Pour arriver à diminuer l'influence des résistances passives, on emploie différents moyens que nous allons faire connaître, en passant en revue les diverses espèces de résistances qui ont été indiquées précédemment.

Le travail dû au frottement de deux pièces qui glissent l'une sur l'autre dépend à la fois de la grandeur de la force de frottement, et de la grandeur du chemin que parcourt son point d'application, c'est-à-dire de l'étendue du glissement. Pour diminuer ce travail résistant, on pourra agir sur chacun des deux éléments dont il se compose. On diminuera d'abord la grandeur du frottement, en choisissant convenablement les matières dont on devra former les pièces destinées à glisser l'une sur l'autre; en polissant les surfaces de ces pièces, et en les entretenant constamment lubrifiées d'huile ou de graisse. D'un autre côté, on réduira autant que possible l'étendue du glissement, en adoptant des formes convenables pour les pièces entre lesquelles ce glissement doit se produire.

C'est ainsi que les arbres, qui doivent recevoir un mouvement de rotation, sont habituellement terminés par des tourillons de fer d'un petit diamètre (fig. 193). Pendant que l'arbre fait un tour entier, le point d'application de la force de frottement du tourillon sur son coussinet parcourt la circonférence du tourillon : le chemin parcouru par ce point est donc d'autant moindre que le diamètre du tourillon est plus petit. On diminue en conséquence ce diamètre, autant qu'on le peut, sans que le tourillon cesse d'être assez résistant pour ne pas se rompre sous la pression qu'il a à supporter.

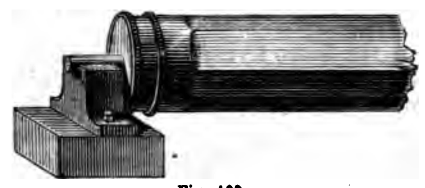


Fig. 193.

C'est encore pour le même motif que l'on forme les engrenages en armant les roues de dents petites et nombreuses: car plus les dents sont grandes, plus l'étendue du glissement de ces dents les unes sur les autres est considérable. On n'est arrêté, dans la petitesse qu'on donne aux dents, que parce qu'elles doivent, comme les tourillons, conserver une solidité suffisante pour ne pas se briser.

§ 139. Pour atténuer autant que possible l'effet produit par la résistance au roulement, on fait disparaître les aspérités des corps qui doivent rouler les uns sur les autres, et, de plus, on fait en sorte que la portion de la puissance qui fait équilibre à la résistance au roulement agisse à l'extrémité d'un grand bras de levier.

On ne peut diminuer le travail résistant produit par la roideur des cordes qu'en employant des cordes très-flexibles. Sous ce rapport, les cordes qui ont déjà servi sont bien préférables aux cordes neuves.

Enfin, pour soustraire, autant qu'on peut, les machines à la résistance des fluides (l'air ou l'eau) au milieu desquels elles se meuvent, on donne aux pièces qui doivent éprouver le plus directement cette résistance une forme telle qu'elles y échappent en grande partie. Ces pièces sont disposées de manière à n'offrir qu'une faible surface à la rencontre du fluide; en outre, elles présentent, du côté du mouvement, des angles très-aigus, de manière à fendre facilement l'air ou l'eau. C'est pour ce motif, ainsi que nous l'avons déjà dit, que, lorsqu'on adapte à certaines machines des volants formés de deux ou trois bras terminés par des masses métalliques (§ 133), on donne à ces masses la forme de lentilles aplaties qui viennent choquer l'air par leur tranche; c'est encore pour atteindre le même but, qu'on remplace quelquefois les boules du régulateur à force centrifuge (§ 134) par des lentilles disposées également de manière à rencontrer l'air par leur tranche.

§ 140. Outre les moyens qui viennent d'être indiqués, dans les deux paragraphes qui précèdent, et qui ont pour objet de diminuer autant que possible l'influence de chacune des résistances passives, sans en changer la nature, on a encore recours à un autre moyen très-efficace : il consiste à remplacer, dans certains cas, la résistance au glissement, ou le frottement, par la résistance au roulement. Toutes les fois que deux pièces, destinées à glisser l'une sur l'autre, sont dans de telles conditions qu'il doive se développer entre elles de grandes pressions, il y a avantage à modifier leur disposition de manière à remplacer le glissement par un roulement : on change par là la nature de la résistance passive qui doit se développer au contact de ces deux pièces, et il en résulte une diminution considérable dans la perte de travail occasionnée par cette résistance.

Nous pouvons donner comme exemple les roulettes qu'on dispose sous les pieds des meubles, et qui permettent de les déplacer plus facilement sans les soulever. Si ces roulettes n'existaient pas, on aurait besoin d'appliquer au meuble une force beaucoup

plus grande, pour le faire glisser. Lorsque le mouvement doit s'effectuer toujours dans une même direction, comme pour les lits, les axes des roulettes sont fixés aux pieds, perpendiculairement à la direction du mouvement (fig. 194). Mais lorsque le mouvement doit pouvoir se faire dans toutes les directions, comme pour les tables ou les fauteuils, l'axe A de la roulette (fig. 195) est fixé à une chape B, qui peut elle-même tourner autour d'un axe vertical CD. Lorsqu'on cherche à déplacer le pied qui porte une pareille roulette, la chape commence par tourner autour de CD, de manière à porter la roulette dans le sens opposé à celui dans lequel doit s'effectuer le mouvement ; puis la roulette tourne autour de son axe A, en roulant sur le parquet.



Fig. 194.



Fig. 195.

Les roulettes qu'on emploie dans les machines, pour substituer le roulement au glissement, sont ordinairement appelées *galets*. Nous en avons vu un exemple dans la grue qui est figurée à la page 64. L'axe vertical PP de grue présente une partie cylindrique R, à l'endroit où il sort du massif de maçonnerie. Cette partie, qui doit tourner dans une ouverture circulaire de même diamètre, exerce une très-grande pression contre les bords de cette ouverture : il est donc très-important que, dans le mouvement qu'on donnera à la grue autour de son axe vertical, il se produise un roulement au lieu d'un glissement, afin qu'on n'éprouve pas une trop grande difficulté à la faire tourner. C'est pour cela qu'on a disposé, tout autour de la partie cylindrique R, des galets S, S, montés sur une même chape mobile, comme le montre la figure 196. Lorsque la grue tourne, chaque galet roule entre la surface cylindrique R, et une autre surface cylindrique concave, qui est scellée dans la maconnerie. Les axes des galets ne



Fig. 196.

restent pas immobiles, ils entraînent la chape qui les réunit, et lui communiquent un mouvement de rotation qui est plus lent que celui de la grue. L'ensemble des galets et de leur chape forme une espèce d'anneau qui a besoin d'être soutenu inférieurement, puisqu'il n'est fixé à rien : il repose pour cela sur une surface plane et annulaire qui fait partie du massif, et, pour éviter le frottement de la face inférieure de la chape sur cette surface, on y a adapté d'autres galets S', S', à axes horizontaux, par lesquels s'appuie tout l'appareil qui nous occupe en ce moment.

Dans la machine d'Atwood, décrite précédemment (page 100), la poulie qui est à la partie supérieure a besoin d'être extrêmement mobile : pour que les expériences faites avec cette machine présentent un certain degré d'exactitude, il faut que les effets soient troublés le moins possible par les résistances passives. Pour y parvenir, on a imaginé un mode particulier de suspension de la poulie, que nous allons décrire. La poulie A (fig. 197) est traversée en son centre par un axe cylindrique de petit diamètre, qui fait corps avec elle. Si cet axe avait été posé dans deux coussinets, il aurait éprouvé un frottement pendant que la poulie aurait tourné ; mais, au lieu de cela, on a placé chacune de ses deux extrémités dans l'angle formé par les circonférences de deux roues B, B, qui sont placées à côté l'une de l'autre, de manière à se recouvrir en partie. Lorsque la poulie tourne, son axe roule sur les quatre roues B, B, sans changer pour cela de position ; le glissement qui aurait eu lieu, si l'axe avait reposé sur deux coussinets, se trouve ainsi remplacé par un roulement, et la résistance que la poulie éprouve est beaucoup moindre. Il se produit cependant encore des frottements entre les axes des roues B, B, et leurs supports ; mais ces frottements n'ont qu'une influence insensible sur le mouvement de la poulie, en raison du faible chemin que parcourent leurs points d'application, pendant que la poulie fait un tour entier (§ 72). L'axe de la poulie A, s'appuyant, comme [nous v]enons de le dire, sur les quatre roues B, B, pourrait en[... gli]sser sur ces roues dans le sens de sa longueur, et dépla-

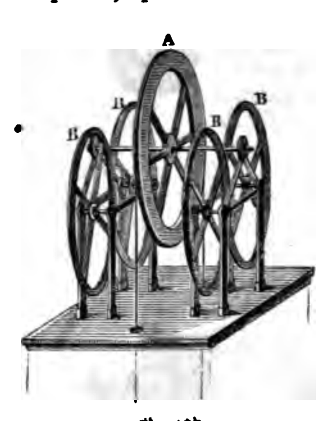


Fig. 197.

cer ainsi la poulie, ce qui nuirait aux expériences : pour empêcher ce mouvement, on a terminé l'axe par deux pointes fines, à ses deux extrémités (fig. 198), et l'on a disposé deux petits plans d'acier, contre lesquels ces deux pointes viennent butter, ce qui maintient l'axe dans une position invariable.

Enfin nous donnerons, comme dernier exemple de la substitution du roulement au glissement, le mode de suspension de la grosse cloche de Metz, qui fonctionne depuis plus de quatre cents ans. Le mouton de cette cloche porte deux tourillons cylindriques, autour desquels la cloche doit tourner, lorsqu'on la fait sonner. Si ces tourillons reposaient dans des coussinets ordinaires, ils éprouveraient des frottements qui tendraient à diminuer le mouvement de la cloche ; en sorte qu'il faudrait employer une plus grande force pour entretenir l'amplitude de ses oscillations. Mais, au lieu de cela, on a appuyé chaque tourillon sur un secteur A (fig. 199), mobile autour de son point d'appui inférieur *a*, et terminé supérieurement par un arc de cercle dont le centre est à ce point d'appui. Lorsque la cloche est en mouvement, le tourillon roule sur ce secteur, qui tourne en même temps autour de son point d'appui *a* ; ce secteur s'incline, tantôt à droite, tantôt à gauche, suivant que la cloche va elle-même à droite ou à gauche. Pour maintenir le tourillon toujours au-dessus du point d'appui du secteur A, on a disposé, de part et d'autre, deux pièces B, C, destinées à l'empêcher de se déplacer latéralement. Si ces deux pièces étaient fixes, il en résulterait encore, à certains moments, un frottement sur le tourillon : aussi a-t-on donné à ces pièces la forme de secteurs, et les a-t-on rendues mobiles autour des points *b*, *c*, de manière à remplacer encore le glissement du tourillon sur leur surface par un roulement. Le tourillon étant toujours appuyé sur le secteur A, il en

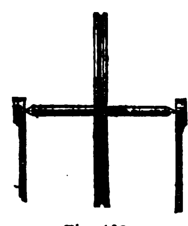


Fig. 198.

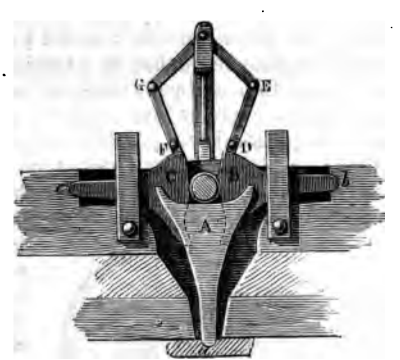


Fig. 199.

résulte une adhérence qui est telle que ce secteur tourne nécessairement en même temps que le tourillon ; et, lorsque la cloche est au repos, le tourillon repose toujours au milieu de l'arc de cercle qui termine ce secteur. Mais il n'en est pas de même pour les deux autres secteurs B, C ; le tourillon s'appuie alternativement sur l'un et sur l'autre, et l'on ne doit pas compter sur l'adhérence de leurs surfaces avec le tourillon, pour le maintenir constamment dans une position convenable : aussi ces secteurs sont-ils soutenus par les tiges DE, FG, articulées, d'une part, en D et F avec les secteurs, et d'une autre part, en E et G avec la partie supérieure du mouton. Pendant le mouvement de la cloche, le haut du mouton s'incline, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, et les secteurs B, C se meuvent en même temps, en s'élevant et s'abaissant alternativement : les choses ont été disposées de telle manière, que les mouvements de ces secteurs soient les mêmes que s'ils avaient été produits par le roulement du tourillon sur leurs surfaces.

§ 141. **Moyens d'augmenter l'influence des résistances passives.** — Habituellement, on doit toujours chercher à atténuer autant que possible l'action des résistances passives, afin de produire le plus qu'on peut de travail utile, avec une quantité donnée de travail moteur ; mais il y a des circonstances exceptionnelles dans lesquelles on a besoin, au contraire, d'augmenter cette action, soit pour modérer la marche de la machine, soit même pour l'arrêter tout à fait. On y arrive en créant des frottements qui n'existent pas dans la marche régulière de la machine ; les pièces qui sont destinées à produire ces frottements sont désignées en général sous le nom de *freins*. Nous nous contenterons, pour le moment, de donner comme exemple le frein qu'on adapte ordinairement aux grues, pour modérer le mouvement des engrenages, dans le cas où l'on veut faire descendre le fardeau qui a été soulevé, sans être obligé de tenir constamment les manivelles. Ce frein consiste en une lame de tôle (fig. 200), qui enveloppe à peu près complétement un tambour cylindrique fixé latéralement à une des roues dentées. On voit ce tambour sur la figure 81, page 64 ; il est à gauche de la roue F, avec laquelle il fait corps. Les deux bouts de la lame de tôle sont

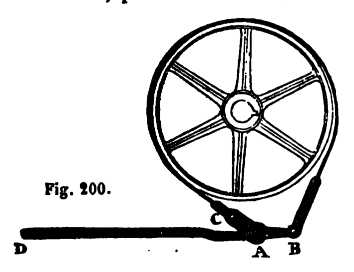


Fig. 200.

attachés aux extrémités B, C, des deux petits bras d'une espèce de levier à trois bras BCD, qui peut tourner autour du point fixe A. Lorsqu'on vient à soulever le grand bras du levier, la lame de tôle se trouve serrée contre la surface du tambour placé à son intérieur, et, si ce tambour tourne, il éprouve un frottement d'autant plus considérable, qu'on agit plus fortement pour soulever l'extrémité D du levier. Lorsqu'on ne veut pas produire ce frottement, on laisse retomber le grand bras du levier, la lame n'est plus serrée contre le tambour, et, si elle le touche encore en quelques points, il n'en résulte qu'un faible frottement. Pendant tout le temps qu'on fait tourner les manivelles de la grue, pour soulever un fardeau, le frein ne fonctionne pas : mais lorsque ce fardeau, après avoir été élevé, se trouve amené, par la rotation de la grue, au-dessus de l'endroit où l'on veut le déposer, on abandonne les manivelles : le fardeau descend en vertu de son poids, en faisant tourner les roues en sens contraire, et on ne laisse pas croître sa vitesse au delà d'une certaine limite, en agissant sur le frein, de manière à faire équilibre au poids du fardeau par le frottement qui se développe.

Nous trouverons, plus tard, l'occasion d'indiquer d'autres freins qui sont destinés à produire des effets analogues à celui dont nous venons de parler.

Lorsqu'il existe dans une machine une pièce qui roule sur une autre, on en profite quelquefois pour augmenter au besoin les résistances passives. Pour cela, on empêche cette pièce de rouler; elle ne peut donc continuer à se mouvoir qu'en glissant, et la résistance qui provenait du roulement est remplacée par un frottement.

§ 142. Pour pouvoir indiquer un moyen de produire rapidement une très-grande résistance, nous allons étudier le frottement qui a lieu entre un cylindre fixe et une corde qui glisse sur sa surface.


Fig. 201.

Soit AE (fig. 201) la portion du contour d'un cylindre sur laquelle glisse une corde, dans le sens de la flèche : la corde est soumise d'une part à la force P, qui tire dans le sens du mouvement, et d'une autre part à la force Q, qui résiste et tire en sens contraire. Le mouvement étant uniforme, la force P est égale à la force Q augmentée de tout le frottement qui se développe le long de l'arc AE.

Pour concevoir comment ce frottement est produit, imaginons que l'arc AE soit divisé en plusieurs parties AB, BC,......, assez petites pour pouvoir être regardées comme de petites lignes droites; l'arc AE sera assimilé, par là, à une portion de polygone sur laquelle la corde glisserait. A un sommet quelconque B, aboutissent deux cordons BC, BA dont les tensions diffèrent l'une de l'autre de la grandeur du frottement produit sur ce point même : ces deux tensions, très-peu différentes, ont une résultante dirigée suivant BB′, qui est la pression exercée par la corde sur le sommet B, et c'est cette pression qui détermine le frottement en B. On voit par là que la tension de la corde va en augmentant constamment, depuis le point A où elle est égale à Q, jusqu'au point E où elle est égale à P; et que, de plus, elle n'augmente pas uniformément, puisque le frottement, en chaque point, est d'autant plus grand que la tension y est elle-même plus considérable.

Pour trouver la loi suivant laquelle varie la tension de la corde, dans la portion de sa longueur qui s'applique sur le contour du cylindre, imaginons que, l'arc de contact étant toujours AE, (fig. 201), la résistance Q devienne double de ce qu'elle était; en doublant la force P, elle fera encore équilibre à la force Q et aux frottements qui se développent. Car les tensions se trouveront toutes doublées, les pressions que ces tensions déterminent en B, C, seront doubles de ce qu'elles étaient : les frottements, qui sont proportionnels aux pressions, seront donc également doubles de de ce qu'ils étaient : en sorte que la force P, après avoir été doublée, sera bien encore égale à la force Q augmentée des forces de frottement, forces qui sont toutes deux fois plus grandes que précédemment. Si l'on rendait la force Q triple, quadruple,... de ce qu'elle était d'abord, il faudrait que la force P eût une valeur triple, quadruple,... de sa valeur primitive, pour qu'il pût toujours y avoir équilibre entre ces deux forces et les frottements développés.



Fig. 202.

Soit AD (fig. 202) l'arc total embrassé par une corde qui glisse sur un cylindre; divisons cet arc en trois parties égales AB, BC, CD. La portion AB de la corde se trouve évidemment dans les mêmes conditions que si la corde,

commençant à s'enrouler en A, se détachait en B, suivant BB′, et était soumise en B′ à une force de traction égale à la tension qui existe au point B. De même la portion BC se comporte comme si la corde, commençant à s'enrouler en B, se détachait en C, et était soumise, en B″ et C′, à des forces respectivement égales aux tensions qui existent en B et C. Enfin, nous pouvons également regarder la portion CD comme appartenant à une corde qui commencerait à s'enrouler en C, se détacherait en D, et serait soumise, à une de ses extrémités C″, à la tension qui a lieu au point C, et à l'autre extrémité à la force P. Admettons, pour fixer les idées, que le frottement qui se développe le long de l'arc AB soit précisément égal à la force Q : la force appliquée suivant BB′, c'est-à-dire la tension au point B, pour faire équilibre à ce frottement et à la résistance Q, devra être double de cette résistance. La force appliquée en B″, à la corde B″BCC′, sera donc double de Q; mais l'arc BC est exactement le même que l'arc AB : il en résulte, d'après ce que nous avons vu, il n'y a qu'un instant, que la force appliquée en C′ devra être double de celle qui est appliquée en B′, c'est-à-dire que cette force, ou bien la tension en C, sera égale à quatre fois la force Q. Enfin, par la même raison, la force appliquée en C″ étant quadruple de la force Q, la force P ne pourra lui faire équilibre qu'autant qu'elle sera égale à huit fois la force Q. En résumé, si nous prenons, sur la portion enroulée de la corde, des points B, C, D, tels que leurs distances au point A croissent en progression arithmétique, les tensions de la corde en ces différents points croîtront comme les termes d'une progression géométrique. On peut dire encore que, si la corde, soumise à une même résistance Q, embrasse le cylindre successivement le long d'arcs croissant comme les termes d'une progression arithmétique, la force P devra, pour faire équilibre à la résistance, avoir des valeurs croissant comme les termes d'une progression géométrique. Supposons, par exemple, que, la corde embrassant le cylindre suivant un certain arc AB (fig. 203), la force P doive, pour faire équilibre à la résistance Q, être égale à 3 fois cette résistance : elle devrait être égale à 9 fois la même résistance, dans le cas où la corde toucherait le cylindre le long d'un arc double AC; elle



Fig. 203.

devrait être égale à 27 fois la résistance, si la corde touchait le cylindre le long d'un arc triple, et ainsi de suite.

§ 143. On profite souvent de la grandeur du frottement développé dans le glissement d'une corde sur un cylindre fixe, pour opposer une résistance convenable à un mouvement qu'on veut modérer, ou même arrêter complétement. C'est ainsi que, pour arrêter un bateau qui se meut sur une rivière, on saisit une corde dont une extrémité est attachée au bateau, et on lui fait faire deux ou trois tours autour d'une pièce de bois cylindrique fixée verticalement dans le sol (fig. 204) ; il suffit ensuite de tirer l'extré-

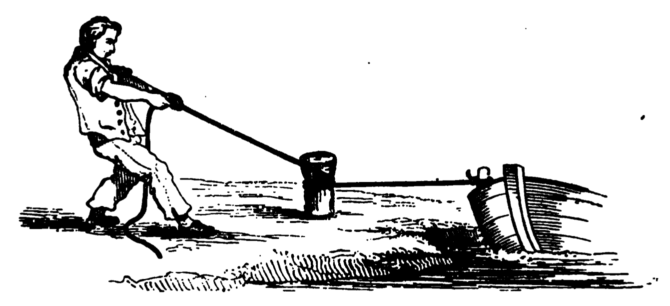


Fig. 204.

mité libre de la corde, pour que le bateau, éprouvant une grande difficulté à la faire glisser sur le cylindre, ralentisse son mouvement de plus en plus, et finisse par s'arrêter tout à fait. D'après ce que nous avons vu dans le paragraphe qui précède, si la corde ne faisait qu'un tour autour du cylindre, et qu'il fallût, pour la faire glisser, lui appliquer, du côté du bateau, une force de traction 5 fois plus grande que la résistance exercée par l'homme qui la retient, cette force de traction devrait être 25 fois plus grande que la résistance, dans le cas où la corde ferait deux tours au lieu d'un seul ; elle devrait être 125 fois plus grande que la résistance, si la corde faisait trois tours ; et ainsi de suite. Mais si le bateau exerce une force de traction sur la corde, réciproquement la corde réagit sur lui, en lui faisant éprouver une résistance égale à cette force de traction : on conçoit donc que, par le moyen qui vient d'être indiqué, une faible résistance appliquée à la corde puisse donner lieu à une résistance extrêmement grande appliquée au bateau.

Lorsque nous avons décrit le cabestan, nous avons dit (page 50), qu'au lieu d'attacher le câble sur la surface du cylindre, on lui

fait faire deux ou trois fois le tour de cette surface, puis qu'on applique à son extrémité libre une force de traction suffisante pour empêcher le câble de glisser. On conçoit maintenant comment une faible force appliquée de cette manière peut suffire pour empêcher le glissement, même lorsque la résistance que doit vaincre le cabestan est très-considérable.

§ 144. **Perte de travail occasionnée par les chocs.** — D'après ce que nous avons vu, lorsque, à un moment quelconque du mouvement d'une machine, le travail moteur qui se développe est plus grand que le travail résistant correspondant, l'excès de travail moteur se transforme en mouvement. Le surcroît de mouvement, que la machine reçoit ainsi, produit ensuite, lorsque le mouvement se ralentit, une quantité de travail résistant précisément égale au travail moteur qui l'avait occasionné. En sorte que, ainsi que nous l'avons observé, l'excédant du travail moteur produit pendant un certain temps, sur le travail résistant correspondant, s'emmagasine dans la machine sous forme de mouvement, et se trouve plus tard complétement utilisé, lorsque l'occasion s'en présente. Il est donc indispensable de conserver le mouvement de la machine autant qu'on le peut, et d'empêcher qu'il ne se détruise, sans produire l'effet qu'il est capable de produire. C'est pour ce motif qu'on doit toujours éviter avec soin qu'il n'y ait des chocs entre les diverses pièces qui sont en mouvement. Pour faire bien comprendre ce qu'il y a de nuisible dans un choc, nous allons entrer dans quelques détails.

Imaginons qu'une balle de plomb A, animée d'une certaine vitesse, vienne choquer une autre balle de plomb B, de même masse et en repos. D'après ce que nous avons vu (§ 118), ces deux balles se mouvront, après le choc, avec une vitesse commune égale à la moitié de la vitesse qu'avait la balle A avant le choc. Voyons maintenant quelles sont les quantités de travail moteur capables de produire le mouvement qui avait lieu avant le choc, et le mouvement qui succède au choc. La balle A, pour acquérir la vitesse qu'elle avait d'abord, aurait dû tomber d'une certaine hauteur; en multipliant cette hauteur par le poids de la balle, on aura la mesure du travail moteur qui se serait transformé dans le mouvement qu'elle possédait immédiatement avant le choc. Les deux balles se mouvant ensemble, après le choc, avec une vitesse moitié de celle qu'avait la balle A, auraient dû tomber, pour acquérir cette vitesse, d'une hauteur quatre fois plus petite que la précédente (§ 89); le travail moteur capable de produire leur mouvement n'est donc que la moitié de celui que nous venons de trouver : puisque, pour l'obtenir, il faut multi-

plier une masse deux fois plus grande par une hauteur quatre fois plus petite. Ainsi le mouvement que possèdent les deux balles, après le choc, ne sera capable de produire que la moitié du travail résistant qui aurait pu être produit par le mouvement de la balle A avant le choc. La modification brusque que le choc a apportée dans le mouvement des deux balles a donc fait perdre la moitié de l'effet que ce mouvement pouvait produire.

Nous venons de prendre pour exemple le choc de deux corps entièrement dépourvus d'élasticité, et c'est pour cela que nous avons trouvé que le choc occasionnait une perte de travail; le résultat aurait été tout différent, si, au lieu de deux balles de plomb, nous avions considéré deux billes d'ivoire. Nous savons en effet que, si la bille A, animée d'une certaine vitesse, vient choquer la bille B de même masse et en repos, la bille A s'arrête complétement, et tout son mouvement passe dans la bille B (§ 119); le mouvement qui a lieu après le choc est donc capable de produire exactement la même quantité de travail résistant que celui qui avait lieu avant le choc: en sorte que, dans ce cas, le choc n'entraîne pas une perte de travail.

Il est aisé de voir à quoi tient la différence de ces effets. Dans le choc des deux balles de plomb, il se produit une déformation qui persiste après le choc; les forces moléculaires s'opposent à cette déformation, qui donne lieu, en conséquence, au développement d'une certaine quantité de travail résistant: c'est précisément ce travail résistant, occasionné par le choc, qui détermine la perte de travail que nous avons constatée. Dans le cas des deux billes d'ivoire, il se produit d'abord une déformation; mais, en vertu de leur élasticité, les deux billes reviennent à leur forme primitive. L'éloignement des molécules de leurs positions d'équilibre donne lieu à un travail résistant: mais ces molécules, en reprenant les places qu'elles occupaient d'abord à l'intérieur des deux billes, développent un travail moteur précisément égal au travail résistant dont on vient de parler. La première partie du choc, celle pendant laquelle la déformation des corps augmente, est accompagnée d'une perte de travail, de même que si ces corps étaient dépourvus d'élasticité; mais la seconde partie, celle pendant laquelle la déformation disparaît, est accompagnée d'un gain de travail qui compense exactement la perte précédente, et il en résulte que le choc tout entier n'a donné lieu à aucune perte de travail.

Ce que nous avons trouvé, dans les deux exemples simples que nous venons de prendre, a lieu encore dans tous les autres cas. Le choc entre deux corps dépourvus d'élasticité détermine tou-

jours une perte de travail, quelles que soient les formes et les masses de ces deux corps, et aussi quelles que soient les circonstances dans lesquelles ce choc se produit. De même le choc entre deux corps parfaitement élastiques n'occasionne aucune perte de travail.

Les pièces qui se choquent dans les machines ne rentrent, en général, ni dans l'une, ni dans l'autre de ces deux classes extrêmes dont nous venons de parler ; elles ne sont, ni dépourvues d'élasticité, ni parfaitement élastiques. Mais, sous le rapport de la perte de travail, les choses se passent à très-peu près comme si ces pièces étaient entièrement dépourvues d'élasticité. En effet, si les corps qui se sont choqués se séparent avant que la déformation produite par le choc ait disparu, et c'est ce qui a lieu habituellement, peu importe qu'elle disparaisse ensuite, ou qu'elle persiste : le travail moteur que produiront les molécules, en revenant à leurs positions d'équilibre, ne fera que déterminer des vibrations, qui se transmettront de proche en proche dans les diverses pièces de la machine, et finiront par se perdre complétement ; ce travail moteur ne pourra, en aucune manière, compenser la perte de travail occasionnée par la déformation que les corps ont éprouvée. Les chocs, dans les machines, sont donc toujours accompagnés d'une perte de travail ; aussi doit-on les éviter avec le plus grand soin : et, si l'on ne peut empêcher certains chocs de se produire, doit-on faire en sorte que les corps qui se choquent présentent un grand degré d'élasticité. Un autre puissant motif doit engager encore à empêcher la production des chocs entre des pièces qui ne sont pas parfaitement élastiques : c'est que les vibrations que ces chocs déterminent causent des ébranlements qui détériorent promptement les machines, et nécessitent de fréquentes réparations.

§ 145. **Conséquences générales de ce qui précède.** — En résumant tout ce qui vient d'être dit sur les machines, considérées à l'état de mouvement non uniforme, nous pouvons dire que :

1° Il n'est pas nécessaire que la puissance fasse toujours équilibre aux résistances ; si, à certains moments, il y a un excès de puissance, il en résulte une augmentation de mouvement capable de produire plus tard le même effet que cet excès de puissance lui-même.

2° Si la puissance et les résistances ne se font pas constamment équilibre, et qu'en conséquence la machine doive emmagasiner, à certains moments, sous forme de mouvement, l'excès du travail moteur sur le travail résistant, on y adapte un volant qui est destiné à empêcher que la vitesse ne varie d'une manière trop

considérable, par l'accumulation du mouvement qu'occasionne cet excès de travail moteur.

3° Si, par l'accumulation successive du mouvement déterminé par l'excès du travail moteur, la vitesse de la machine peut devenir trop grande, l'emploi d'un régulateur à force centrifuge permet d'agir sur la puissance, pour en régler la grandeur, de manière à maintenir la vitesse de la machine entre des limites convenables.

4° Les résistances passives qui se développent dans le mouvement d'une machine, absorbant inutilement une portion de la puissance, il est nécessaire de disposer la machine de manière à diminuer leur influence autant qu'on le peut.

5° Enfin, les chocs entre deux corps qui ne sont pas parfaitement élastiques, occasionnant toujours des pertes de travail, on doit les éviter par tous les moyens possibles; et, si l'on ne peut pas y arriver, on doit faire en sorte que les pièces qui se choquent soient élastiques.

Maintenant que nous sommes arrivés à la connaissance des divers principes nécessaires pour l'étude des machines, nous allons en faire l'application à un certain nombre d'exemples, choisis parmi ceux qui peuvent présenter le plus d'intérêt.

APPLICATION DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS A L'ÉTUDE DE QUELQUES MACHINES.

§ 146. **Descente, transport et érection de l'obélisque de Luxor.** — L'obélisque qu'on voit à Paris, au centre de la place de la Concorde, a été amené, il y a peu d'années, de la haute Égypte, où il servait d'ornement à l'entrée principale du palais de Luxor. Nous allons voir par quels moyens on est parvenu à déplacer cette pierre colossale, et à l'installer dans la position qu'elle occupe maintenant : c'est un des meilleurs exemples qu'on puisse donner de l'emploi des machines pour vaincre des résistances considérables.

L'obélisque est de granit, et a la forme d'un tronc de pyramide carrée très-allongée, surmonté sur sa petite base d'un pyramidion irrégulier. Le côté de la base inférieure a $2^m,42$; celui de la base supérieure a $1^m,54$: la distance de ces deux bases, comptée suivant l'axe, est de $21^m,60$; enfin le pyramidion a une hauteur de $1^m,20$. A l'aide de ces dimensions, on trouve que le volume de l'obélisque est de 84 mètres cubes. D'ailleurs le mètre cube de granit pèse $2\,750^k$: le poids de l'obélisque est donc d'environ 230 000 kilogrammes. Si l'obélisque était aussi large en

haut qu'en bas, son centre de gravité serait sur son axe, et au milieu de sa longueur; mais, en raison de la plus grande largeur de la partie inférieure, ce point se trouve un peu plus bas, à environ 9 mètres de la base. Nous savons que la considération du centre de gravité est indispensable, toutes les fois qu'il s'agit de faire mouvoir des corps pesants.

Pour amener l'obélisque de la haute Égypte à Paris, on avait construit un navire qui pût le transporter, depuis le point du Nil le plus rapproché du palais de Luxor, jusque dans l'intérieur de Paris. Ce navire, nommé *le Luxor*, devait donc descendre le Nil dans une longueur de 800 kilomètres, venir de l'embouchure de ce fleuve au Havre, à travers la Méditerranée et l'océan Atlantique, et enfin remonter la Seine, du Havre à Paris, dans une longueur de 400 kilomètres. Ce transport par eau a présenté de très-grandes difficultés, tant sur mer que sur les deux fleuves, en raison de la forme spéciale qu'on avait dû donner au navire, pour qu'il pût marcher dans des circonstances si diverses, avec un chargement considérable. Mais nous n'avons pas à nous en occuper ici : nous n'examinerons que les moyens dont on s'est servi pour descendre l'obélisque de sa base, en Égypte, et l'introduire dans l'intérieur du navire; puis ceux qui ont été employés, à Paris, pour le transporter du navire sur la place de la Concorde, et pour l'ériger sur son piédestal, au milieu de cette place.

§ 147. On profita d'abord de la crue du Nil, pour amener le navire dans un lieu qu'on jugea convenable à l'embarquement, et où il devait se trouver à sec, lorsque les eaux du Nil se seraient retirées. Puis on construisit un chemin, allant en pente douce, depuis ce lieu jusqu'à l'obélisque. Pour donner à ce chemin une plus grande inclinaison, et faciliter ainsi le transport de l'obélisque au navire, on le fit aboutir, non pas à la base de l'obélisque, mais à 5 mètres au-dessus de cette base. Les opérations à effectuer pour embarquer l'obélisque consistaient donc à le renverser, pour le coucher sur le haut de cette espèce de plan incliné ; puis à le faire mouvoir le long de ce plan, jusqu'à ce qu'il fût introduit dans le navire, qui était placé sur le prolongement du chemin, et dont on avait enlevé la partie antérieure.

La première partie de ces opérations était celle qui présentait les plus grandes difficultés : il fallait renverser le monolithe, en le soutenant de manière à l'amener lentement, et sans secousses, dans une position à peu près horizontale. Si les machines employées pour cela n'avaient pas présenté une solidité suffisante, elles auraient cédé sous le poids de l'obélisque, et il se serait infailliblement brisé en tombant.

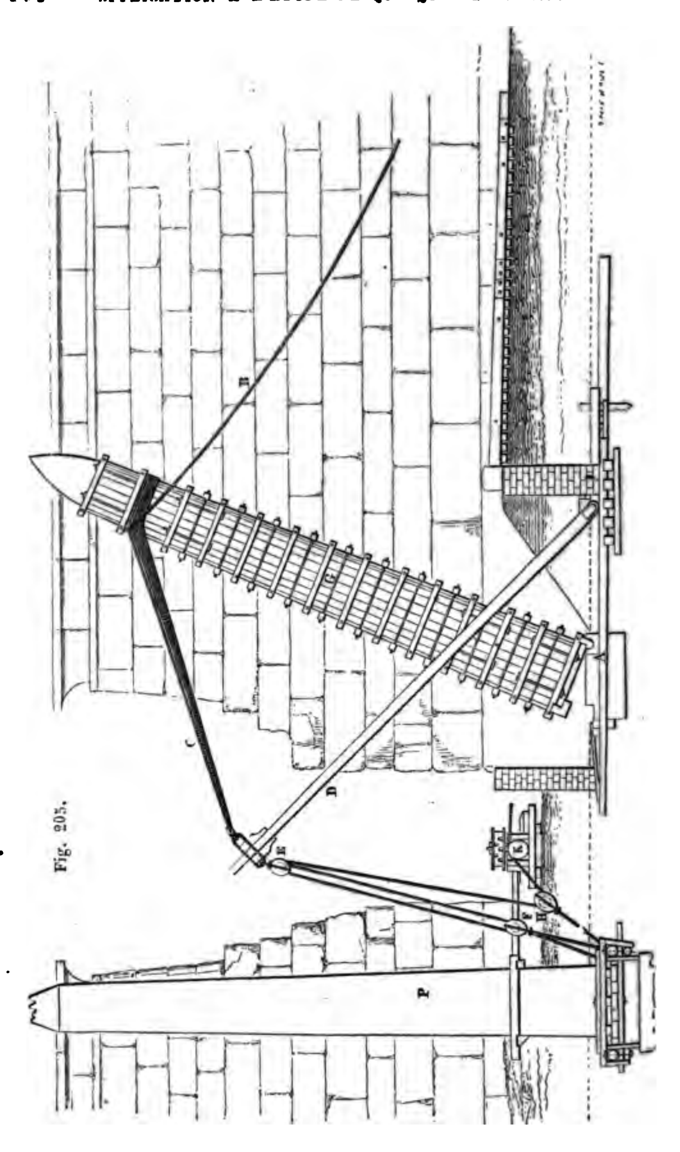


Fig. 205.

Après avoir recouvert ses quatre faces d'une enveloppe de bois destinée à garantir les inscriptions dont elles sont couvertes, on dégagea complétement l'arête de sa base qui se trouvait du côté du plan incliné, puis on adapta, tout du long de cette arête, une forte pièce de bois, entaillée de manière à l'emboîter complétement. Cette pièce de bois A (fig. 205) était arrondie extérieurement, et se trouvait placée dans une sorte de large cannelure, pratiquée dans une autre pièce de bois de grande dimension, qui devait rester fixe, tandis que la première pièce devait suivre l'obélisque dans son mouvement. C'est autour de cette espèce de charnière que l'on devait faire tourner l'obélisque, pour l'abaisser sur le haut du plan incliné.

Pour produire ce mouvement, on attacha des câbles B à la tête de l'obélisque ; puis, en les tirant fortement, à l'aide de cabestans, on amena la tête du côté du plan incliné. L'ensemble des forces nécessaires pour déterminer ce premier déplacement n'était qu'une petite fraction du poids total de l'obélisque, parce que leurs directions étaient beaucoup plus éloignées de l'axe de rotation A, que la verticale passant par le centre de gravité du monolithe. D'ailleurs ces forces n'avaient besoin d'agir que jusqu'à ce que le centre de gravité G vînt se placer verticalement au-dessus de l'axe A, comme le montre la figure 206 : car, aussitôt que le corps aurait dépassé cette position, il devait continuer de lui-même à tourner autour de l'axe A, en vertu de l'action de la pesanteur. C'est alors que l'obélisque devait être retenu assez fortement, pour que son poids ne lui communiquât qu'un mouvement très-lent et régulier.

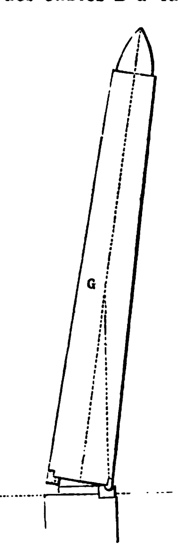


Fig. 206.

Il eût été extrêmement difficile de retenir l'obélisque, à l'aide de câbles disposés comme les câbles B dont nous venons de parler, mais placés de l'autre côté : de pareils câbles de retenue auraient dû exercer une résistance énorme vers la fin de l'opération. On voit en effet que, à mesure que le mouvement de rotation s'effectue, la verticale menée par le centre de gravité s'éloigne de plus en plus de l'axe A, tandis qu'au contraire, la direction de ces câbles de retenue se serait rapprochée de plus en plus de cet axe ; en sorte

que, d'une part, le bras de levier sur lequel agit le poids de l'obélisque augmente constamment, et d'une autre part le bras de levier de l'ensemble des résistances chargées de modérer le mouvement, aurait été toujours en diminuant, jusqu'à devenir très-petit. Aussi a-t-on adopté une autre disposition, qui a permis de descendre l'obélisque sans avoir à exercer une si grande résistance.

La résistance nécessaire pour modérer la descente a été appliquée par l'intermédiaire d'un cadre D, mobile autour de son côté inférieur. Ce cadre était formé de huit mâts disposés dans un même plan, quatre d'un côté de l'obélisque, et quatre de l'autre côté, ainsi que le fait voir la figure 207 : les extrémités in-

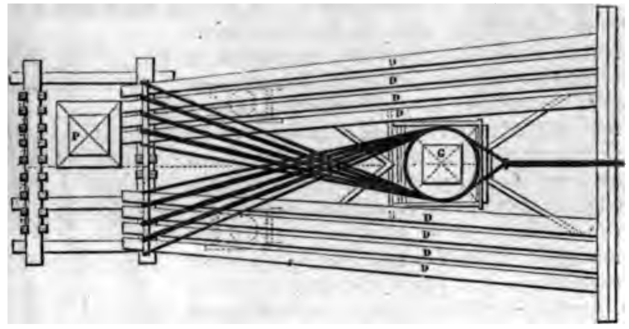


Fig. 207.

férieures étaient implantées dans une pièce solidement appuyée dans un angle; et leurs extrémités supérieures, rapprochées les unes des autres, étaient réunies par deux moises, de manière à former un tout capable d'une grande résistance. Des câbles C étaient attachés d'une part à l'obélisque, et d'une autre part à l'extrémité supérieure du cadre D ; c'est ensuite à ce cadre que la résistance a été appliquée, à l'aide des systèmes de moufles E, F. Si l'on examine les différentes positions qu'a dû prendre l'obélisque, pendant l'opération de la descente, et les positions qu'a prises en même temps le cadre D, tournant autour de son côté inférieur, on verra que les câbles C se sont toujours trouvés à une grande distance de l'axe de rotation A de l'obélisque, et que les câbles des moufles E, F ont également toujours été convenablement éloignés de l'axe de rotation du cadre D. Ces câbles, agissant à l'extrémité de bras de levier qui ne devaient pas devenir trop petits, n'ont pas eu besoin de présenter une

résistance aussi excessive que si les systèmes de moufles E, F avaient été directement appliqués à la tête de l'obélisque.

Les systèmes de moufles E, F étaient au nombre de huit; chacun d'eux agissait directement sur l'extrémité supérieure de l'un des huit mâts formant le cadre D, ainsi qu'on le voit sur la figure 208. Une étude attentive de la disposition que devaient prendre les diverses parties de l'appareil, pendant toute l'opération, a fait voir que la résistance que chaque système de moufles aurait ainsi à exercer, sur son point d'attache au cadre D, ne dépasserait pas 13 000 kilogrammes. Ces moufles étaient d'ailleurs formées chacune de trois poulies réunies dans une même chape, en sorte que la corde qui passait sur les diverses poulies d'un même système formait six cordons parallèles, également tendus. Pour que la résistance exercée par l'ensemble de ces six cordons fût de 13 000 kilogrammes, il fallait donc que la tension de la corde fût d'un peu plus de 2 000 kilogrammes. Ainsi les huit cordes qui se détachaient des huit systèmes de moufles, et qui étaient rendues horizontales à l'aide des poulies H (fig. 205), devaient servir seules à exercer toute la résistance nécessaire, pour laisser descendre lentement l'obélisque; et la tension de chacune d'elles ne devait guère dépasser 2 000 kilog., au moment où elles auraient à produire la plus grande résistance. Voici par quels moyens une pareille tension a été obtenue.

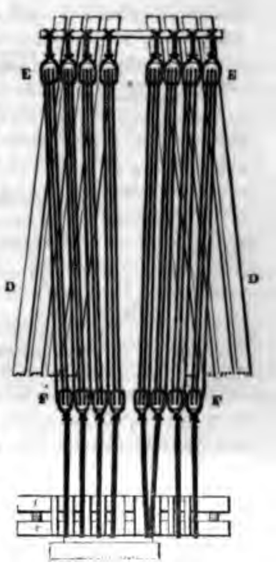


Fig. 208.

Chaque corde, après s'être détachée horizontalement d'une des poulies H, venait s'enrouler sur une espèce de treuil K, sur lequel elle faisait deux tours; puis elle le quittait pour venir s'enrouler autour d'un mât fixe L (fig. 209); ensuite elle changeait de direction, en passant sur une poulie de renvoi portée par la pièce M; enfin, après s'être encore enroulée autour d'un second mât fixe N, elle venait aboutir dans les mains d'un matelot. Pour que l'obélisque pût descendre, il fallait que les moufles supérieures s'éloignassent des moufles inférieures, et qu'en conséquence une longueur de corde, de plus en plus grande, vînt s'en-

gager dans les systèmes de moufles. Les diverses portions de la corde, à mesure que le matelot la laissait filer dans ses mains, devaient donc glisser sur les surfaces des deux mâts fixes L, N, et faire tourner en même temps le treuil K, dont le mouvement de

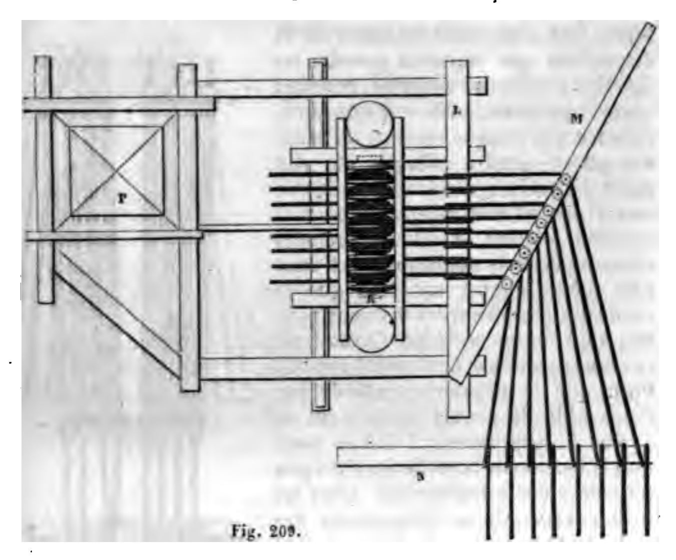


Fig. 209.

rotation pouvait se produire sans aucune résistance. Nous verrons tout à l'heure quel était l'objet de ce treuil; mais nous pouvons concevoir tout de suite comment la résistance exercée par un homme sur la corde qu'il laissait filer entre ses mains pouvait suffire pour déterminer une tension de plus de 2 000 kilogrammes sur la portion de cette corde qui s'engageait dans les moufles, puisque cette tension devait, en outre, vaincre le frottement de la corde sur les deux mâts fixes L, N. Ainsi, par la disposition adoptée, huit matelots, en retenant convenablement les cordes sur lesquelles ils agissaient, pouvaient maintenir l'obélisque en équilibre, dans une quelconque des positions qu'il devait prendre en s'abaissant ; et, en lâchant ces cordes, ils pouvaient le laisser descendre avec toute la lenteur nécessaire au succès de l'opération. Au reste, l'expérience a prouvé que, lors même que la résistance à exercer devait être la plus grande, ces matelots n'ont pas eu à déployer plus de la moitié de leur force.

Le treuil K, sur lequel chaque corde faisait deux tours, et qui

tournait librement, à mesure que les cordes marchaient, ne contribuait pas à augmenter leur tension; il constituait cependant une des parties les plus importantes de l'appareil, et a été d'une grande utilité pour la réussite de l'opération. Il était destiné à empêcher qu'il n'y eût des tensions inégales dans les parties des huit cordes qui étaient engagées dans les moufles. Si un des matelots avait exercé sur sa corde une résistance moins grande que les autres, cette corde aurait glissé plus facilement sur les mâts L, N; elle aurait marché plus que les autres cordes, et sa tension dans les moufles aurait été plus faible. Les moufles correspondant à cette corde n'exerçant pas sur le cadre D toute la résistance qu'elles devaient exercer, les autres moufles auraient eu à résister plus fortement que si tout eût été régulier. Or, il aurait pu arriver de là que certaines moufles eussent à supporter une charge beaucoup plus forte que celle pour laquelle elles avaient été construites; si ces moufles s'étaient brisées sous cet excès de charge, les autres se seraient trouvées à leur tour trop chargées, et tout l'appareil de retenue aurait été rompu. L'emploi du treuil K a eu pour objet de s'opposer à ce grave accident, en maintenant de l'uniformité dans les tensions des huit cordes, et faisant ainsi que la résistance à exercer fût régulièrement répartie entre les huit systèmes de moufles. On voit, en effet, que, toutes les cordes s'enroulant à côté les unes des autres sur le treuil K, ce treuil, en tournant, les laissait marcher toutes d'une même quantité, en sorte que leurs tensions dans les moufles, égales au commencement de l'opération, devaient se conserver égales pendant toute sa durée. Si un matelot venait à laisser filer trop facilement sa corde, la tension de cette corde diminuait jusqu'au treuil : mais cette diminution ne pouvait être assez forte pour que la corde glissât sur le treuil : en conséquence, de l'autre côté du treuil, sa tension était la même que celle de toutes les autres. Le treuil K avait donc pour objet de répartir uniformément, entre les diverses cordes, l'ensemble des tensions résultant des résistances inégales des huit matelots, de telle sorte que les tensions des 48 cordons qui réunissaient les moufles inférieures aux moufles supérieures fussent exactement les mêmes. Par ce moyen, on a pu employer, pour exercer une résistance de 13 000 kilogrammes, des moufles dont les dimensions avaient été calculées sur une charge de 15,000 kilogrammes seulement; et avec de pareilles moufles, l'opération n'aurait probablement pas réussi, si le treuil K n'avait pas distribué régulièrement la résistance.

La figure 209 fait voir que la surface du treuil K n'était pas simplement cylindrique : elle présentait comme huit gorges de pou-

lies, dans chacune desquelles venait s'enrouler une des cordes. Il est aisé de faire comprendre la nécessité de cette disposition. Supposons qu'une corde fasse quelques tours sur un cylindre, et s'en détache de part et d'autre, comme on le voit dans la figure 63 (page 50), de telle manière que, lorsque le cylindre tournera, la corde s'enroule d'un côté, et se déroule de l'autre. Il est clair que la corde ne se trouvera pas toujours en contact avec les mêmes points de la surface du cylindre : les spires suivant lesquelles elle s enroulera successivement se placeront à côté les unes des autres, la corde marchera le long du cylindre, et viendra bientôt le toucher à une de ses extrémités. C'est précisément ce qui serait arrivé pour les cordes enroulées sur le treuil K, si la surface de ce treuil eût été cylindrique. Pour obvier à cet inconvénient, qui aurait fait manquer l'opération, on a pratiqué sur la surface du treuil huit rainures en forme de gorges de poulies, dans chacune desquelles une des cordes devait constamment rester. Ces espèces de gorges de poulies présentaient un côté conique, que la corde devait envelopper. Pendant le mouvement, la corde s'enroulait sur la partie la plus grosse du rebord conique, et se détachait du fond de la gorge ; elle tendait donc à grimper sur ce rebord : mais elle glissait constamment, et était ainsi toujours ramenée au fond de la gorge.

Il ne suffisait pas de pouvoir donner aux 48 cordons qui réunissaient les moufles supérieures aux moufles inférieures des tensions régulières et assez grandes pour soutenir l'obélisque dans sa chute; il fallait encore que les moufles inférieures fussent attachées en des points présentant une assez grande résistance, pour ne pas céder sous la force de traction qu'ils devaient avoir à supporter. A cet effet, des pièces de bois furent solidement fixées à la base d'un second obélisque P, qui existait de l'autre côté de l'entrée du palais, et c'est à ces pièces de bois que les moufles inférieures furent reliées par des câbles d'une grande résistance.

Le renversement de l'obélisque de sa base, par les moyens qui viennent d'être décrits, eut lieu sans accident le 31 octobre 1831, et s'effectua dans l'espace de 25 minutes.

§ 148. Nous avons dit que le plan incliné qui devait servir au transport de l'obélisque dans le navire s'élevait jusqu'à 5 mètres au-dessus de sa base. L'obélisque, en tournant autour de la pièce A, devait venir s'appliquer sur l'extrémité de ce plan, avant d'avoir atteint une position horizontale ; et, comme son centre de gravité se serait trouvé au delà de cette extrémité, il devait continuer à s'abaisser, en tournant autour de ce nouveau point d'appui, et abandonnant par conséquent le premier, A. Il se produisit un effet

différent de celui qu'on attendait. L'extrémité du plan i laquelle l'obélisque devait s'appuyer vers la fin de l'opération s'affaissa sous le poids énorme qu'elle avait à supporter, et l'obélisque continua à descendre, sans cesser de tourner autour de la pièce A, jusqu'à ce que la résistance opposée par son nouvel appui fût assez forte pour vaincre son poids. Mais alors l'obélisque reposait sur une large surface, à l'intérieur de laquelle passait la verticale correspondant à son centre de gravité; en sorte que le mouvement de bascule, sur lequel on comptait, ne s'est pas produit.

Pour amener l'obélisque à être couché sur le haut du plan incliné, on a dû soulever sa base, à l'aide de moufles et de cabestans, et le tirer en même temps par le sommet, afin de le faire glisser dans le sens de sa longueur. A partir de là, on n'a plus eu qu'à le faire glisser sur toute la longueur du plan incliné, en le tirant à l'aide de cabestans qu'on déplaçait à mesure qu'il avançait. On avait soin, pour faciliter le glissement, de recouvrir le chemin de madriers, qu'on enlevait successivement dans la partie que l'obélisque venait de quitter, pour les reporter en avant, sur la partie du chemin qu'il allait atteindre. Ces madriers étaient constamment graissés, afin de diminuer le frottement.

Enfin, lorsque l'obélisque arriva près du navire, dont on avait enlevé la partie antérieure, on le tira jusque dans son intérieur, en disposant l'appareil de traction

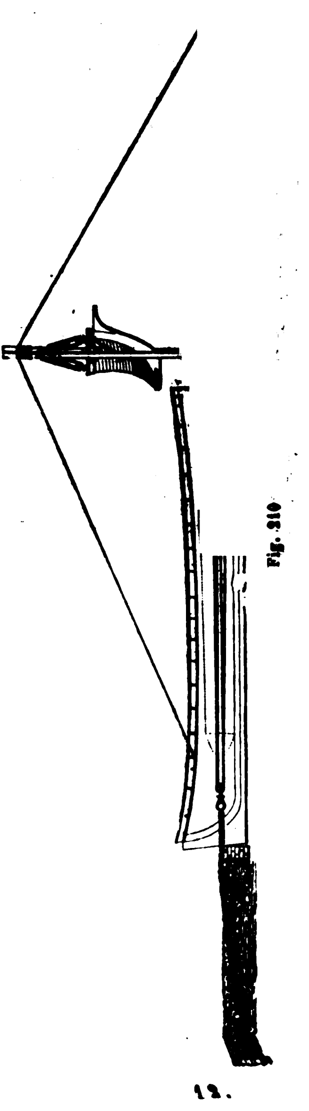


Fig. 210.

comme l'indique la figure 210. Lorsque l'obélisque fut convenablement installé, on referma l'ouverture qui avait été pratiquée dans le navire, en rapprochant la portion qu'on avait enlevée, et la fixant assez solidement pour qu'il n'y eût pas à craindre de rupture pendant toute la traversée.

§ 149. Le navire se mit en marche pour la France le 26 août 1832, et arriva à Paris, près la place de la Concorde, le 23 décembre 1833.

Dès lors on disposa tout pour le débarquement et l'érection de l'obélisque. Les moyens qu'on employa pour cela sont exactement les mêmes que ceux qui avaient servi, en Égypte, à faire les opérations inverses.

On détacha la partie antérieure du navire, pour rétablir l'ouverture par laquelle l'obélisque avait été introduit; on tira l'obélisque, à l'aide de cabestans, pour le faire sortir du *Luxor*, et le faire monter sur le quai par un plan incliné. Pour l'embarquer, on l'avait fait glisser la tête en avant; il dut marcher en sens contraire pour le débarquement : sa base se présentait la première.

Lorsqu'il fut arrivé sur le quai, on le tira le long d'un plan incliné, construit à cet effet, et qui aboutissait au niveau de la face supérieure du piédestal sur lequel on devait le dresser. Il fut ainsi amené dans une position telle, qu'il n'avait plus qu'à tourner autour de l'arête inférieure de sa base, pour venir se placer sur son piédestal. Ce mouvement de rotation s'effectua, comme pour la descente, autour d'une forte pièce de bois, qui embrassait dans toute sa longueur l'arête dont on vient de parler, et qui devait tourner, en même temps que l'obélisque, autour de sa surface extérieure, arrondie à cet effet. Pour cela, il fallut d'abord soulever l'obélisque par la tête, jusqu'à ce que son centre de gravité eût dépassé le plan vertical mené par l'axe de rotation : à partir de là, il continua à tourner, en vertu de l'action de la pesanteur, sa base vint s'arrêter sur la face supérieure du piédestal, et il prit ainsi la position qu'on devait lui laisser définitivement.

L'appareil qui servit à soulever l'obélisque, dans la première partie de l'opération, c'est-à-dire jusqu'à ce que son centre de gravité eût atteint le point le plus haut du cercle qu'il devait décrire, était exactement le même que l'appareil de retenue employé pendant la descente, et décrit précédemment. Seulement les câbles, qui se détachaient des systèmes de moufles, ne s'enroulaient plus autour de mâts fixes sur lesquels ils devaient glisser, et n'aboutissaient plus entre les mains d'autant d'hommes qui devaient les laisser filer : ces câbles venaient s'enrouler

sur les tours d'un même nombre de cabestans, à l'aide desquels on exerçait sur eux une force de traction suffisante.

Pendant la seconde partie de l'opération, lorsque l'obélisque n'eut plus qu'à céder à l'action de la pesanteur pour achever sa rotation, il fut retenu par des câbles attachés à sa tête, comme l'étaient les câbles de traction employés en Égypte pour commencer l'opération de la descente.

L'érection de l'obélisque à Paris eut lieu le 25 octobre 1836. Tous les travaux de descente en Égypte, de transport de l'Égypte en France, et d'érection à Paris, furent effectués sous la direction de M. Lebas, ingénieur de la marine. L'idée de l'appareil de retenue, pour la descente, est de M. Mimerel, autre ingénieur de la marine.

§ 150. **Moulins à farine.** — Pour extraire des grains la farine qu'ils contiennent, on les broie entre deux pierres: l'enveloppe de chaque grain se trouve brisée; ses débris, qu'on désigne sous le nom de *son*, se mêlent à la farine; et il ne reste plus qu'à les séparer à l'aide d'un tamis, qui laisse passer la farine à travers son tissu, sans laisser passer le son. C'est dans les *moulins à farine* que s'effectuent ces opérations: nous allons voir quelle est la disposition de la partie de ces moulins dans laquelle les grains sont broyés.

Les pierres, ou *meules*, qui servent à effectuer cette opération, ont été pendant longtemps mises en mouvement par des hommes ou des animaux; maintenant elles sont toujours mues, soit par l'eau, soit par le vent, soit par la vapeur. Les figures 211 et 212 représentent la disposition d'un moulin à eau. Une roue hydraulique est mise en mouvement par une chute d'eau. Nous ne nous arrêterons pas sur cette roue sur laquelle nous reviendrons plus loin, pour nous rendre compte de la manière dont l'eau la fait tourner. L'arbre A de la roue hydraulique (fig. 211), pénètre à l'intérieur du bâtiment qui renferme le moulin, et communique son mouvement de rotation à un arbre vertical B, à l'aide de roues d'angle. Sur l'arbre B est fixée une grande roue dentée horizontale C; et cette roue peut communiquer son mouvement à deux meules, par l'intermédiaire de deux autres roues dentées plus petites D, E (fig. 212). Chacune de ces deux roues peut glisser le long de l'arbre vertical sur lequel elle est montée, et lorsqu'on l'a amenée ainsi dans la position où elle doit rester, on la fixe sur son arbre à l'aide de coins qu'on introduit entre elle et l'arbre, dans des rainures pratiquées à cet effet. De cette manière, les roues D, E peuvent être placées à la hauteur de la grande roue C, afin d'engrener avec elle; ou bien on peut les

abaisser au-dessous de cette roue, pour supprimer la communication de mouvement. La figure 212 montre la roue D placée de manière à tourner sous l'action de la roue C; tandis que la roue E, n'engrenant pas avec cette roue C, n'en reçoit aucun mouvement. On peut donc, à volonté, faire marcher les deux meules à la fois, ou bien n'en faire marcher qu'une seule, suivant les besoins. La figure 212 montre les deux paires de meules qui correspondent aux deux roues D, E : mais elle ne les montre pas de la même manière. La portion de gauche de cette figure est une coupe destinée à faire voir la disposition relative des deux meules, entre lesquelles le grain est broyé. La portion de droite, au contraire, est une élévation qui montre l'enveloppe octogone de bois, à l'intérieur de laquelle se trouvent les meules, ainsi que l'appareil placé au-dessus, et destiné à leur fournir le grain.

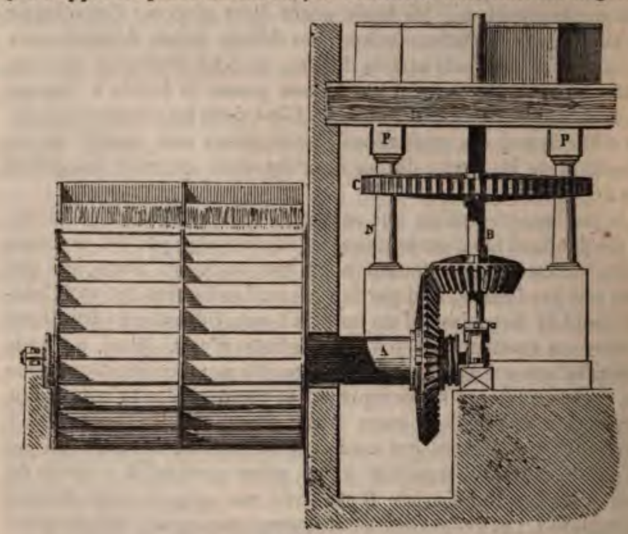


Fig. 211.

L'arbre F, sur lequel est montée la roue E, traverse une première meule qui reste fixe, et qu'on nomme *meule dormante* ; il s'élève un peu au-dessus, et supporte sur sa tête la seconde meule, ou *meule courante*. Cette seconde meule n'a pas d'autre point d'appui : son centre de gravité doit être tellement placé, que sa face inférieure se maintienne horizontale, afin qu'il existe tout autour une même distance entre les deux meules. Pour satis-

faire à cette condition, c'est-à-dire pour *équilibrer* la meule courante, on ajoute du plâtre en divers points de sa face supérieure, jusqu'à ce qu'elle ne penche pas plus d'un côté que de l'autre.

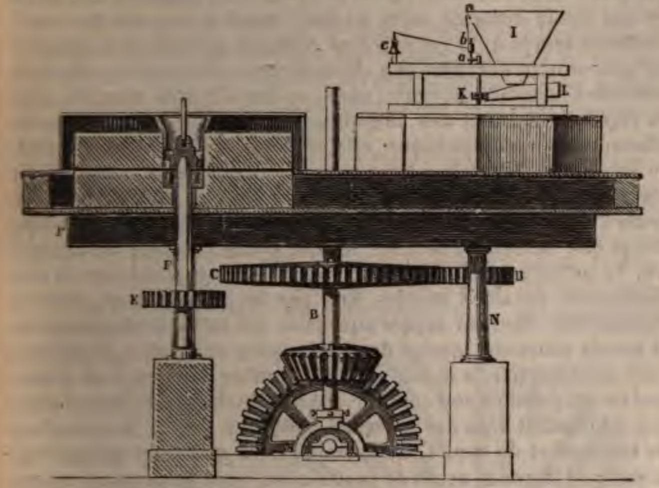


Fig. 212.

Pour que les deux meules aient entre elles une distance convenable, on élève ou l'on abaisse la meule courante; on y parvient en faisant monter ou descendre, à l'aide d'une vis, la crapaudine sur laquelle repose le pivot inférieur de l'arbre F.

Le grain qui doit être soumis à l'action des meules est placé dans une trémie I; à la partie inférieure de cette trémie, existe une ouverture dont la grandeur peut être réglée à volonté. Immédiatement au-dessous est suspendue une petite auge inclinée L; son mode de suspension lui permet d'osciller facilement, sous l'action des oreilles K, fixées à un prolongement de l'axe qui supporte la meule courante. Lorsque la meule tourne, ces oreilles K viennent successivement choquer latéralement l'auge L, et déterminent l'écoulement d'une petite quantité du grain contenu dans la trémie. Le grain qui tombe ainsi, peu à peu, pénètre dans une ouverture centrale de la meule courante, ouverture qui n'est interceptée qu'en partie par la pièce de fer qui sert à suspendre la meule sur la tête de l'arbre F; il arrive, de cette manière, au centre de la face supérieure de la meule dormante, et s'engage entre les deux meules. L'ouverture centrale de la meule dor-

mante, dans laquelle tourne l'arbre F, est garnie de cuir et de drap, afin d'éviter que le grain ne la traverse pour tomber au-dessous de cette meule. La meule courante tend à entraîner chaque grain dans son mouvement de rotation : et comme il n'existe qu'une faible distance entre les deux meules, le grain est broyé en même temps qu'il est entraîné. Chaque parcelle qui est mise en mouvement décrirait une circonférence de cercle si elle était attachée à la meule courante; mais, au lieu d'y être attachée, elle en reçoit seulement des impulsions successives, et en vertu de chacune de ces impulsions, elle se déplace suivant la tangente au cercle que décrit la partie correspondante de la meule. Il en résulte que les poussières qui proviennent de l'écrasement du grain s'éloignent du centre de la meule dormante, en même temps que la meule courante les fait tourner autour de ce centre. Le mélange de farine et de son, ainsi transporté vers la circonférence des deux meules, finit par les abandonner, et vient s'accumuler dans un espace annulaire qui existe tout autour de la meule courante. Arrivé dans cet espace annulaire, il est encore entraîné par la meule, et vient tomber dans un trou pratiqué en un point de son contour. De là le mélange de farine et de son est conduit dans des appareils destinés à opérer la séparation de la farine et du son. Ces appareils, ainsi que ceux qui servent à nettoyer le grain avant de le moudre, sont également mis en mouvement par la roue hydraulique : à cet effet, l'arbre B se prolonge à travers le plancher qui est au niveau des meules, et porte, vers sa partie supérieure, les roues et tambours nécessaires à cette transmission de mouvement.

Une sonnette *c* est disposée de manière à avertir le meunier, lorsque la trémie ne contient presque plus de grain. La sonnette est reliée par une ficelle à un taquet de bois, *b*, qui est traversé par une tige verticale de fer. Ce taquet peut monter ou descendre le long de cette tige, et peut également tourner autour d'elle, sans la moindre difficulté : il est soutenu par une autre ficelle qui pénètre dans la trémie en passant sur une petite poulie, et qui se termine par un morceau de bois assez léger. Ce morceau de bois est enfoncé dans le grain de la trémie, et s'y maintient tant que le grain est en quantité suffisante, de manière à soutenir le taquet *b* à une hauteur convenable; mais lorsqu'il n'y a presque plus de grain dans la trémie le taquet *b* retombe, en faisant remonter le morceau de bois, qui n'est plus retenu par le grain. Dès lors, un doigt *a*, qui est fixé au prolongement de l'arbre de la meule courante, et qui tourne en même temps que cette meule, vient choquer le taquet *b* à chaque tour, et fait ainsi

sonner la sonnette. Le bruit qui en résulte ne cesse de se faire entendre qu'après que le meunier, ayant rempli la trémie, a enfoncé dans le grain le morceau de bois qui soutient le taquet *b* au-dessus du doigt *a*.

Des colonnes N, au nombre de quatre, reposent sur deux blocs de pierre, et supportent deux fortes pièces de bois P, sur lesquelles sont installées les deux meules dormantes. Les mêmes blocs de pierre portent des crapaudines sur lesquelles s'appuient les arbres des meules courantes.

§ 151. Les meules sont quelquefois formées d'un seul morceau de pierre ; mais alors elles sont généralement défectueuses. Les meilleures meules sont construites par la réunion de plusieurs pierres bien choisies, liées entre elles par du plâtre, et fortement consolidées par des cercles de fer. Le diamètre d'une meule, dans les anciens moulins, varie de 1m,80 à 2m,30 ; mais dans les nouveaux moulins, dits à l'anglaise, les meules n'ont que 1m,30 de diamètre. Les meules qui sont formées de pierres choisies, ne présentant pas de cavités, ont besoin d'être taillées d'une manière particulière pour que leur surface ne soit pas tout à fait unie. On y pratique habituellement des espèces de sillons, dirigés du centre à la circonférence, et disposés comme l'indique la figure 213. Les sillons ne sont pas tracés suivant des rayons, mais présentent au contraire une obliquité très-prononcée sur leur direction, et cela dans le même sens sur les faces de chacune des deux meules. On comprend aisément, d'après cela, que, lorsque ces deux faces sont appliquées l'une sur l'autre, ce qui n'a pu se faire qu'en retournant la meule courante, les sillons de cette meule font un angle avec ceux de la meule dormante, au-dessus desquels ils sont placés ; et, pendant que la

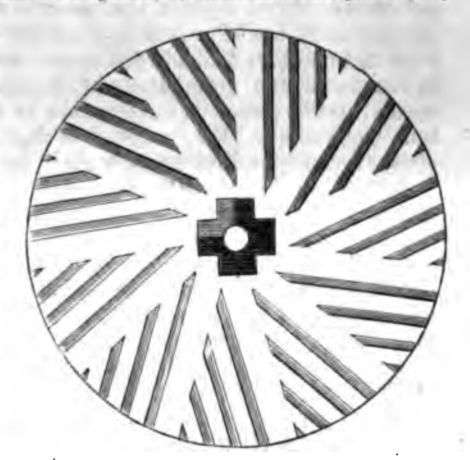


Fig. 213.

meule courante tourne, les bords de ces sillons agissent comme les deux lames d'une paire de ciseaux que l'on ferme. Les sillons n'ont que peu de profondeur, et cette profondeur va en diminuant progressivement d'un bord à l'autre bord, où elle se réduit à rien. La figure 214 est une coupe faite dans les deux meules, placées l'une au-dessus de l'autre, afin de montrer la forme de la section transversale des sillons, et la manière dont ils se présentent sur l'une et l'autre meule. La flèche indique le sens du mouvement de la meule supérieure.

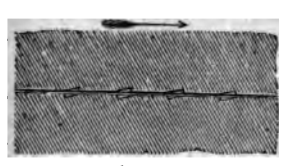


Fig. 156.

Une paire de meules peut moudre de 15 à 16 hectolitres de blé par 24 heures. On a reconnu que, pour obtenir une bonne mouture, on doit faire faire à la meule courante environ 70 tours par minute. On en déduira sans peine le nombre de tours que devra faire l'arbre de la roue hydraulique dans une minute, à l'aide des nombres de dents des roues dentées qui établissent la communication de mouvement depuis cet arbre jusqu'à la meule. On disposera en conséquence la roue hydraulique de telle manière que, sous l'action de la chute d'eau, elle prenne la vitesse qu'on aura ainsi trouvée.

§ 152. **Scieries mécaniques.** — Le mouvement régulier que doit prendre une scie, pour scier le bois, peut être produit par une machine mue, comme un moulin, soit par un cours d'eau, soit par le vent, soit par la vapeur. On obtient même par là des résultats bien préférables à ceux qu'on pourrait obtenir avec des scies mues à la main. Les scies mécaniques sont très-fréquemment employées dans les pays de montagnes, où de nombreuses chutes d'eau permettent de débiter les bois presque sans frais. En Hollande, il existe de temps immémorial des scieries qui marchent par l'action du vent.

Comme exemple de ce genre de machines, nous prendrons une des scies de la scierie mécanique de Saint-Maur, près Paris. Cette scierie contient seize scies, qui reçoivent toutes leur mouvement d'une chute d'eau agissant sur une turbine. La plupart des scies servent à fabriquer des feuilles d'acajou pour le placage; quelques-unes sont employées à faire des planches. C'est une des premières que nous allons décrire.

La turbine, qui reçoit l'action de l'eau, fait tourner un arbre horizontal, ou arbre de couche, qui s'étend dans toute la longueur de l'atelier. Sur cet arbre sont adaptés, de distance en dis-

tance, des tambours, A (fig. 215), qui reçoivent sur leur contour des courroies sans fin, destinées à transmettre le mouvement de l'arbre aux mécanismes des scies. Chaque courroie vient embrasser un second tambour B, de plus petit diamètre que le tambour A, et lui communique un mouvement de rotation très-rapide. Elle a besoin pour cela d'avoir une tension suffisante, sans quoi elle glisserait sur le tambour B : cette tension est déterminée par la pièce de bois CD, tournant librement autour d'un boulon D, et s'appuyant sur la courroie par le galet C, qui tourne



Fig. 215.

en même temps que la courroie marche. Pour arrêter le mécanisme qui communique avec le tambour B, il suffit de relever la pièce de bois CD; la courroie n'est plus tendue, et elle marche sans entraîner le tambour, sur la surface duquel elle glisse.

Un volant E est adapté à l'extrémité de l'axe du tambour B; un des rayons du volant porte un boulon F, qui traverse l'extrémité d'une bielle FG; cette bielle, articulée en G au châssis de la scie, est mise en mouvement par le volant, comme par une manivelle, et son extrémité G prend un mouvement de va-et-vient suivant la ligne horizontale *mn*.

Le châssis de la scie, qui est placé horizontalement, a, comme à l'ordinaire, la forme d'un rectangle traversé en son milieu, dans le sens de sa longueur, par une tringle de bois HH (fig. 216);

un des côtés du rectangle, celui qui est en arrière de la tringle HH, est formé par la lame de scie II, dont les deux faces sont verticales, et dont les dents sont tournées vers le bas ; l'autre côté

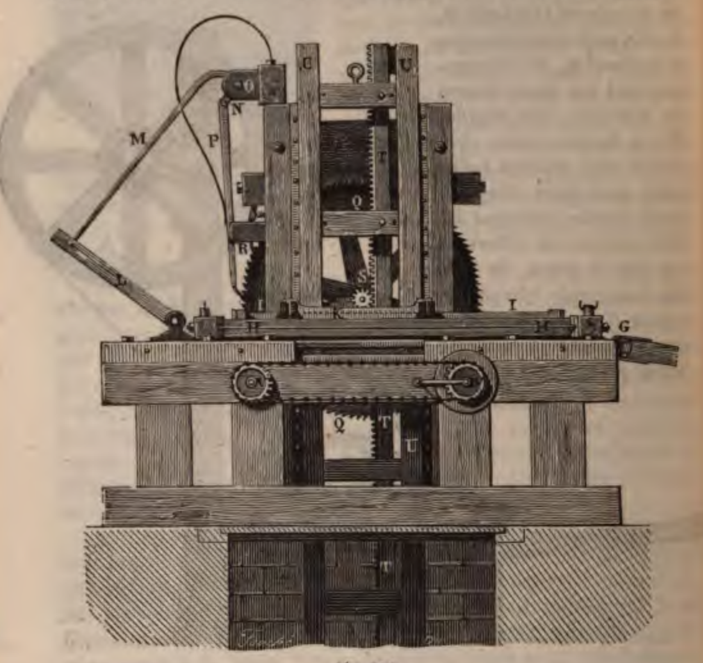


Fig. 216.

du rectangle est occupé par une tige de fer placée en avant de la tringle HH, et dont les extrémités sont garnies de filets de vis et d'écrous, destinés à donner une forte tension à la lame de scie, dans le sens de sa longueur. Contre la face antérieure de la lame de scie, se trouve une pièce de fer K, taillée en biseau le long de son bord inférieur, et destinée à maintenir la lame de scie toujours exactement dans la même position, pendant qu'elle est animée du mouvement rapide de va-et-vient qui lui est transmis par la bielle articulée en G. Le mouvement du châssis est d'ailleurs dirigé d'une manière précise par des languettes de fer qui glissent dans des coulisses fixées au support du mécanisme.

D'après la manière dont la scie est disposée, elle ne peut ni s'élever ni s'abaisser ; dans son mouvement de va-et-vient, elle reste toujours exactement à la même hauteur. Il est donc nécessaire que la pièce d'acajou qui doit être sciée se déplace, afin de se présenter d'elle-même aux dents de la scie ; voici la disposition qui a été adoptée pour atteindre ce but. Le morceau d'acajou X (fig. 217) est collé à la colle forte sur un châssis YY ; ce châssis est ensuite fixé, à l'aide de boulons et d'écrous, sur le cadre UU (fig. 216), qui peut se mouvoir verticalement, et qui est dirigé dans ce mouvement par des languettes de fer glissant dans des coulisses, comme le châssis horizontal de la scie. Une bielle L, articulée d'un bout à l'extrémité du châssis de la scie, est traversée à l'autre bout par la tige de fer M, qui pour cela se recourbe horizontalement. Les deux pièces de fer M et N forment comme les deux bras d'un levier coudé, qui peut tourner autour du point O ; en sorte que le mouvement de va-et-vient du cadre de la scie détermine un mouvement d'oscillation du bras de levier N autour du point O, par l'intermédiaire de la bielle L, et du long bras de levier M. A l'extrémité du bras de levier N, est articulée une tige P, qui se termine par une petite fourchette, ou *pied-de-biche ;* ce pied-de-biche vient s'engager entre les dents d'une roue Q, et y est maintenu par un grand ressort courbe qui l'appuie toujours sur le contour de la roue. Un autre pied-de-biche R, articulé en un point fixe, s'engage de même entre les dents de la roue Q, et y est également maintenu par un petit ressort à boudin. Par suite des oscillations continuelles du bras de levier N, le pied-de-biche P s'élève et s'abaisse successivement : lorsqu'il s'élève, il ne fait que glisser sur les saillies des dents de la roue Q ; mais lorsqu'il s'abaisse, il saisit une de ces dents, et la force à s'abaisser, ce qui fait tourner la roue. Le pied-de-biche R n'a d'autre objet à remplir que d'empêcher la roue Q de se mouvoir en sens contraire, pendant que le pied-de-biche P remonte. L'axe de la roue Q porte un pignon S, qui engrène avec une crémaillère T faisant corps avec le cadre UU. On voit donc que, pendant que la scie est animée d'un mouve-

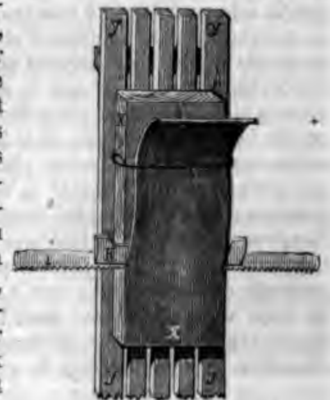


Fig. 217.

ment de va-et-vient, la pièce d'acajou sur laquelle elle doit agir, et qui est invariablement attachée au cadre UU, monte d'un mouvement lent et intermittent. La scie peut donc pénétrer dans le morceau d'acajou, et le diviser ainsi en deux parties.

Pour le placage, on a besoin d'obtenir des feuilles d'acajou extrêmement minces, en sorte que ces feuilles sont flexibles, et lorsque la scie en a détaché une longueur déjà un peu grande, elles ne peuvent plus se soutenir d'elles-mêmes. La figure 217 montre de quelle manière on soutient ces feuilles d'acajou, pendant que l'opération marche, et que la scie en détache une longueur de plus en plus grande. La pièce de fer biseautée K, qui est appliquée contre la face antérieure de la lame de scie, écarte la feuille d'acajou du morceau restant; et, plus haut, cette feuille est embrassée par une sorte d'arc en fort fil de fer, qui fait ressort, et dont les extrémités recourbées ont été éloignées l'une de l'autre, pour venir s'appuyer sur les faces latérales du morceau d'acajou.

Toute la partie de l'appareil qui supporte le cadre UU peut se mouvoir de l'arrière à l'avant. Ce mouvement se produit à l'aide de deux vis très-longues, dont les têtes V, V, apparentes sur la figure 216, sont munies de deux petites roues dentées du même diamètre. Une chaîne sans fin embrasse ces deux petites roues en sorte que l'une des deux ne peut pas tourner sans que l'autre tourne exactement de la même quantité et dans le même sens. Une manivelle, fixée à l'une d'elles, sert à les faire mouvoir. A l'aide de cette manivelle, on fait tourner les deux vis, qui sont disposées de manière à ne pas marcher dans le sens de leur longueur; les écrous qui sont engagés dans ces vis sont donc obligés de marcher en avant ou en arrière, suivant qu'on fait tourner la manivelle dans un sens ou dans l'autre, et ils entraînent dans ce mouvement le cadre UU auquel ils sont fixés. On conçoit qu'à l'aide d'un pareil mécanisme, on puisse, avant de commencer un nouveau trait de scie, faire avancer ce cadre, et le morceau d'acajou qui y est attaché, d'une quantité déterminée, aussi petite qu'on voudra, et que, par conséquent, on puisse obtenir des feuilles d'une épaisseur très-petite et toujours la même.

§ 153. Le tambour A (fig. 215) fait environ 55 tours par minute; son diamètre étant 5 fois plus grand que celui du tambour B, celui-ci fait environ 275 tours par minute : c'est aussi le nombre de coups que donne la scie dans le même temps. A chaque coup de scie, le morceau d'acajou monte d'environ $\frac{1}{3}$ millimètre. Avec une scie de ce genre, on peut obtenir 6 mètres carrés de feuilles dans un jour. La quantité dont on fait avancer le morceau d'acajou à l'aide des vis V, V, chaque fois qu'on veut faire un

nouveau trait de scie, est de $1^{mm},2$; et comme le déchet en sciure est de 50 pour 100, il s'ensuit que chaque feuille d'acajou n'a guère plus de ½ millimètre d'épaisseur.

Les scies mécaniques employées pour faire des planches sont disposées verticalement, et marchent moins vite que les scies à placage; elles ne donnent que 110 à 140 coups par minute. La quantité dont on fait marcher le morceau de bois, à chaque coup de scie, varie de 2 à 5 millimètres, suivant la dureté du bois.

On emploie aussi fréquemment des scies circulaires, qui fonctionnent en tournant toujours dans le même sens, tandis que les scies rectilignes doivent nécessairement avoir un mouvement de va-et-vient. Les scies circulaires servent à scier le bois ou les métaux. Pour égaliser les bouts des rails des chemins de fer, et donner à ces rails une longueur uniforme, on coupe les bouts, après les avoir fait rougir ; on se sert pour cela de scies circulaires de tôle bien battue, qui ont un mètre de diamètre et $2^{mm},75$ d'épaisseur, et qui font 850 tours par minute. Afin que la scie ne s'échauffe pas trop, on fait plonger sa partie inférieure dans un vase qui renferme de l'eau.

§ 151. **Marteaux de forges.** — Les gros marteaux qui servent, dans les forges, à travailler les fortes pièces de fer, sont mis en mouvement par des roues hydrauliques ou des machines à vapeur : nous donnerons pour exemple de ces marteaux celui qui est représenté par la figure 218, et qui a fonctionné pendant longtemps dans les ateliers de M. Cavé, à Paris.

La tête A du marteau est de fonte, et pèse plus de 1 700 kilogrammes. Elle est percée d'une large ouverture, dans laquelle pénètre l'extrémité du manche B, qui y est fixé à l'aide d'un coin. Ce manche porte, vers le milieu de sa longueur, deux tourillons placés l'un d'un côté, l'autre de l'autre; ces tourillons sont supportés par deux coussinets adaptés, en C, à deux fortes pièces de bois verticales entre lesquelles passe le manche du marteau. Deux cames D, D, fixées à un arbre horizontal, viennent successivement, pendant la rotation de l'arbre, appuyer sur la queue du manche B; le marteau est soulevé, retombe, est soulevé de nouveau, et ainsi de suite. L'arbre qui porte les cames D, D, reçoit son mouvement de rotation d'une machine à vapeur qui agit sur la manivelle E. Deux volants F, exactement pareils, sont fixés sur cet arbre, l'un d'un côté des cames D, D, l'autre de l'autre côté. La figure ne peut faire voir qu'un seul de ces deux volants ; celui qui est en avant cache celui qui est en arrière.

Un long levier GH, mobile horizontalement autour du petit axe vertical K, est fixé en G à une forte barre de fer, à l'aide de

laquelle on arrête le travail du marteau. A cet effet, pendant que

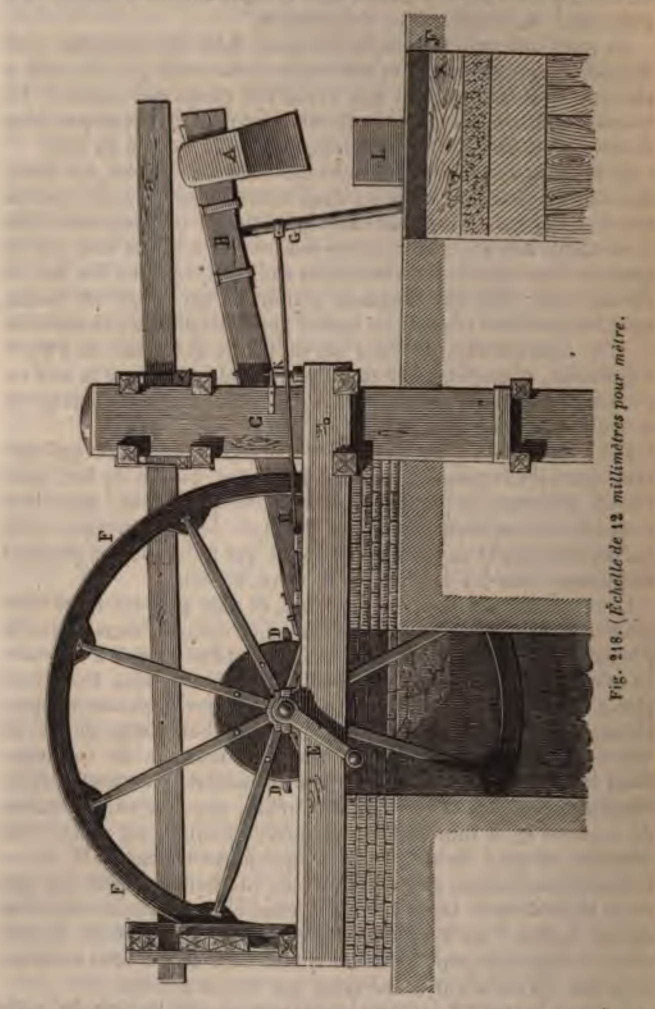


Fig. 218. (*Échelle de 12 millimètres pour mètre.*)

le marteau fonctionne, on tire en avant l'extrémité H du levier; la barre de fer, attachée à l'autre extrémité G de ce levier, se

reporte en arrière, et vient se placer sous le manche du marteau, de manière à l'empêcher de retomber sur l'enclume L. Si les cames D, D, continuent à agir sur la queue du manche, le marteau se soulève bien un peu ; mais il ne tombe ensuite que d'une petite quantité, et reste ainsi suspendu au-dessus de l'enclume, à une distance convenable pour qu'on puisse facilement manœuvrer la pièce de fer qui doit être forgée. Lorsqu'on veut mettre le marteau en activité, on fait marcher la machine à vapeur : l'arbre des cames tourne ; chaque fois qu'une came vient à rencontrer la queue du marteau, elle le soulève un peu, et le laisse retomber aussitôt sur la barre de fer qui le soutient. On saisit alors le moment où le marteau est soulevé, pour pousser rapidement en arrière l'extrémité H du levier ; l'extrémité G se trouve ainsi reportée en avant, en entraînant la barre de fer qui soutenait le marteau, et celui-ci, ne rencontrant plus d'obstacle, tombe sur l'enclume.

§ 155. Il est aisé de voir pourquoi l'arbre des cames a été muni de volants. Cet arbre est soumis à l'action incessante de la machine à vapeur, qui tend constamment à accélérer son mouvement ; tandis qu'il n'a de résistance à vaincre qu'au moment où une des cames se trouve en contact avec la queue du marteau. Le mouvement de rotation de l'arbre serait donc très-irrégulier, si les volants n'existaient pas, en raison de la grande irrégularité des résistances qui lui sont appliquées. Ce mouvement s'accélérerait sans cesse, depuis le moment où une des cames quitterait la queue du marteau, jusqu'à celui où l'autre came viendrait la saisir ; et aussitôt que l'action d'une came commencerait, la vitesse de l'arbre diminuerait brusquement d une quantité considérable. Nous avons vu (§ 133) que l'objet des volants est précisément d'empêcher cette grande variation dans la vitesse d'une machine.

Un seul volant aurait suffi pour arriver au but qui vient d'être indiqué, c'est-à-dire pour régulariser le mouvement de rotation de l'arbre ; car il eût été facile de le construire de manière à lui donner une puissance égale à celle des deux volants agissant ensemble. C'est pour une raison particulière qu'on en a mis deux au lieu d'un seul. Non-seulement la résistance appliquée à l'arbre n'agit que par intermittence ; mais encore, lorsqu'elle commence à agir, elle prend brusquement une très-grande intensité. La came, qui se meut assez vite, vient rencontrer la queue du marteau qui est immobile ; il se produit un choc très-violent, puisque ce choc doit mettre immédiatement en mouvement toute la masse du marteau et de son manche. L'arbre des cames est

donc soumis, au moment de ce choc, à l'action d'une force résistante énorme. S'il était muni d'un seul volant, qui serait nécessairement placé à côté des cames, les chocs successifs qu'il éprouverait tendraient à le tordre ; tandis que cet effet ne peut se produire, par suite de l'emploi de deux volants égaux, disposés symétriquement de part et d'autre des cames.

§ 156. On voit, sur la figure, une longue pièce de bois horizontale, qui passe entre les deux volants, et se prolonge jusqu'au-dessus de la tête du marteau. Cette pièce est destinée à augmenter le nombre des coups de marteau qu'on peut donner dans un même temps, sans pour cela diminuer l'intensité de chacun de ces coups. Pour s'en rendre compte, il faut observer que la came, en agissant sur le marteau, lui communique une certaine vitesse dirigée de bas en haut ; lorsque la came l'abandonne, il continue à monter, en vertu de sa vitesse acquise, et s'il ne rencontrait pas d'obstacle, il monterait jusqu'à ce que l'action de la pesanteur eût complétement détruit sa vitesse ; alors il retomberait, et viendrait choquer la pièce de fer placée sur l'enclume avec la vitesse due à la hauteur dont il serait tombé (§ 89). Pour que le choc se produisît avec une vitesse déterminée, il faudrait donc, si les choses se passaient ainsi, que l'intervalle de temps compris entre deux coups de marteau fût assez grand pour que le marteau pût s'élever à la hauteur correspondant à cette vitesse, et retomber ensuite de toute cette hauteur ; en sorte que, plus la vitesse du marteau, au moment du choc, devrait être grande, moins ce marteau pourrait donner de coups dans un même temps. Si, au contraire, le marteau rencontre, en montant, un obstacle élastique qui l'empêche de s'élever davantage, et qui le renvoie avec une vitesse, dirigée de haut en bas, égale à celle qu'il avait au moment où il l'a rencontré, il retombera plus tôt, et les coups seront plus précipités, sans perdre de leur intensité. C'est dans ce but qu'on emploie la pièce de bois qui nous occupe. Elle présente une assez grande élasticité, pour que les choses se passent à peu près comme nous venons de le dire. Le choc de la tête du marteau contre cette pièce de bois diminue bien un peu l'intensité des coups du marteau, mais cette diminution est accompagnée d'une augmentation considérable dans la rapidité du travail.

Il ne faut pas croire cependant que le moyen qui vient d'être indiqué, pour augmenter le nombre des coups que le marteau peut donner pendant un certain temps, tout en affaiblissant un peu la grandeur de chacun d'eux, accroisse la puissance de la machine, c'est-à-dire lui fasse produire une plus grande quan-

tité de travail utile, avec une même dépense de travail moteur. Si le marteau donne plus de coups en une heure, il faudra que la machine à vapeur agisse en conséquence, et développe une plus grande quantité de travail moteur : en général, la quantité de travail développée par cette machine sera proportionnelle au nombre de coups que le marteau donnera, quel que soit le temps que durera l'opération. L'emploi de la pièce de bois qui limite la course verticale du marteau présente plutôt un inconvénient qu'un avantage, sous ce rapport : puisque le choc du marteau contre cette pièce entraîne toujours une diminution dans la grandeur du coup qu'il donne en retombant, et que, par conséquent, avec une même quantité de travail moteur, on produit moins de travail utile.

§ 157. Nous avons dit précédemment (§ 144) qu'il fallait éviter, autant que possible, qu'il se produisît des chocs entre les diverses pièces d'une machine en mouvement. La machine dont nous nous occupons est loin de satisfaire à cette condition ; mais les chocs qui ont lieu pendant qu'elle fonctionne ne jouent pas le même rôle, sous le rapport de la perte de travail qu'ils peuvent occasionner. D'abord le choc du marteau contre la pièce de fer qu'il s'agit de forger n'entraîne pas de perte de travail : c'est dans ce choc même que consiste le travail que la machine doit effectuer, et l'on ne peut pas chercher à l'éviter. La perte de travail produite par un choc entre des corps non élastiques est due, en grande partie, à la déformation permanente que ces corps éprouvent par l'effet du choc ; et c'est précisément cette déformation qu'on veut obtenir ici, en employant le marteau. Seulement comme l'enclume ne peut pas être rendue rigoureusement immobile, on a soin de la faire reposer sur un ensemble de pièces de bois, placées, les unes verticalement, les autres horizontalement ; en sorte que l'élasticité de ce support lui permet de céder un peu, au moment du choc du marteau, et la ramène ensuite dans la position qu'elle occupait avant le choc.

En second lieu, le choc de la tête du marteau contre la pièce de bois qui l'arrête quand il s'élève, ne donne lieu qu'à une faible perte de travail, en raison de la flexibilité et de l'élasticité que présente cette pièce, d'après la manière dont elle est disposée.

Il ne reste plus que le choc des cames contre la queue du marteau, qui est réellement nuisible par les ébranlements et la perte de travail qu'il détermine.

§ 158. **Bocards.** — On donne le nom de *bocard* à un appareil composé de plusieurs pilons, qu'on soulève, pour les laisser retomber ensuite, afin de pulvériser les matières soumises à leur

action. Des bocards sont fréquemment employés dans le voisinage des mines métalliques, pour réduire en poudre les minerais qui contiennent des parties non métalliques ou *gangues*, ce qui permet ensuite de les débarrasser facilement de ces gangues. Les figures 219 et 220 représentent un bocard qui sert à pulvériser le minerai de plomb de la mine de Huelgoat, en Bretagne.

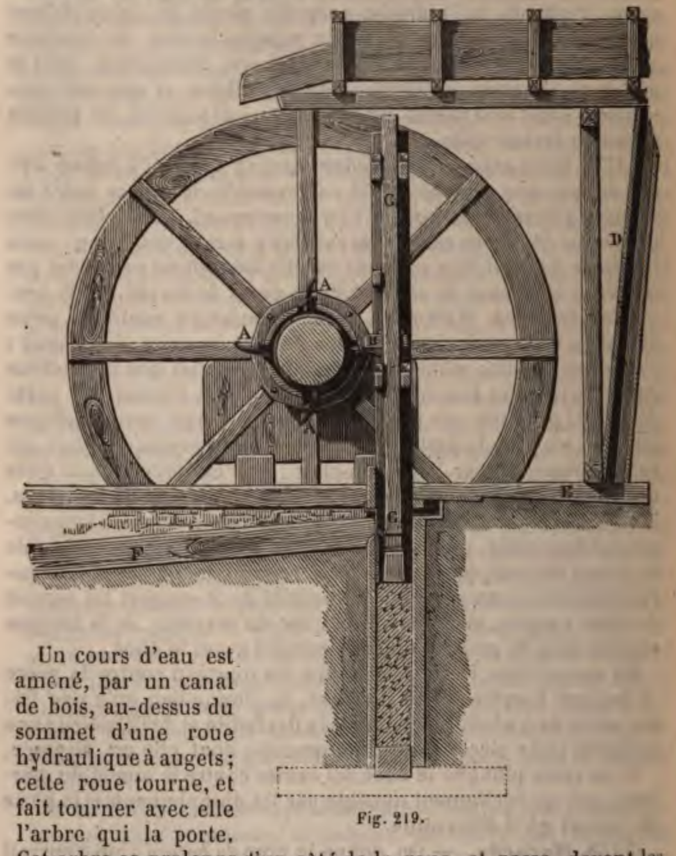


Fig. 219.

Un cours d'eau est amené, par un canal de bois, au-dessus du sommet d'une roue hydraulique à augets; cette roue tourne, et fait tourner avec elle l'arbre qui la porte. Cet arbre se prolonge d'un côté de la roue, et passe devant les pilons, qui sont rangés à la suite les uns des autres, parallèlement à l'axe de l'arbre. En face de chacun des pilons, on a fixé

sur l'arbre un anneau qui porte quatre cames de fonte A, A (fig. 219); lorsque l'arbre tourne, chacune des cames vient successivement soulever le mentonnet B, fixé à la tige C du pilon, et l'abandonne ensuite, après l'avoir soulevé. Pendant que l'arbre fait un tour, chaque pilon s'élève et retombe quatre fois; il est dirigé dans ces mouvements par des guides, dans lesquels passe sa tige.

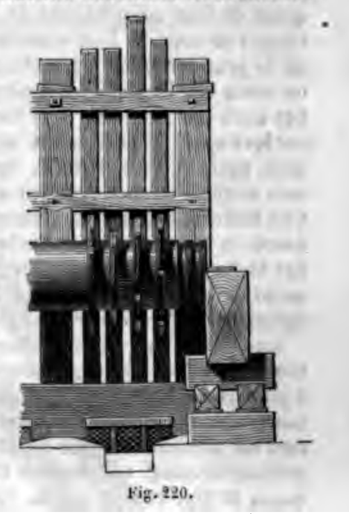


Fig. 220.

Si les cames étaient disposées sur l'arbre de manière à commencer en même temps à soulever les différents pilons, elles les élèveraient tous ensemble, et les laisseraient ensuite retomber tous à un même instant. La résistance que l'arbre aurait à vaincre serait très-inégale, puisque, après avoir conservé une valeur assez grande, et sensiblement la même, pendant que les pilons auraient été soulevés par les cames, elle deviendrait brusquement nulle, à l'instant où les cames abandonneraient les pilons pour les laisser retomber tous à la fois. Le mouvement de rotation de l'arbre s'accélérerait donc, et se ralentirait successivement d'une manière très-notable, ce qui nuirait à la marche de la roue hydraulique. Pour régulariser le mouvement, on pourrait adapter un volant à l'arbre des cames, comme on l'a fait pour le marteau de M. Cavé, que nous avons décrit précédemment. Mais on n'a pas besoin d'avoir recours à ce moyen ; on régularise convenablement le mouvement, en donnant aux cames une disposition autre que celle que nous venons d'indiquer: voici en quoi consiste cette disposition.

Les pilons dont le bocard se compose sont au nombre de douze. On les a divisés en trois groupes de quatre ; chaque groupe forme une batterie. La figure 220 représente une seule des trois batteries, vue de face : on y voit une portion de l'arbre qui passe en avant et qui porte les quatre anneaux à cames correspondant aux quatre pilons de la batterie. Ces anneaux ont été fixés à l'arbre de manière que les quatre pilons soient soulevés, non en même temps, mais successivement. Pendant un tour entier de l'arbre, chaque pilon est soulevé quatre fois ; de sorte que

l'arbre fait un quart de tour, depuis l'instant où le pilon est saisi par une came, jusqu'à l'instant où il est saisi par la suivante. Ce quart de tour est subdivisé en quatre parties égales, ou en seizièmes de tour. Si l'on examine la batterie, à partir de l'instant où le premier pilon à gauche (fig. 220) est saisi par une came, on verra que le second pilon entrera en mouvement lorsque l'arbre aura fait $\frac{1}{16}$ de tour ; le troisième pilon commencera à être soulevé après $\frac{2}{16}$ de tour ; le quatrième pilon, après $\frac{3}{16}$ de tour ; puis, après $\frac{4}{16}$ ou $\frac{1}{4}$ de tour, le premier pilon, qui est retombé, sera soulevé de nouveau, et ainsi de suite. Ce qui a lieu pour une batterie a lieu pour chacune des deux autres. De cette manière, la résistance que l'arbre doit vaincre se trouve répartie sur toute la durée de chaque tour, et sa valeur reste sensiblement la même d'un moment à un autre. Le mouvement de rotation de l'arbre doit donc être sensiblement uniforme.

Au-dessous de chaque batterie existe une auge, dans laquelle tombent les pilons; c'est dans cette auge qu'on met le minerai à pulvériser. Les pilons, qui sont de fonte, viennent choquer les morceaux de minerai qu'ils rencontrent en tombant, et les brisent en parcelles de plus en plus petites. Un petit courant d'eau, pris sur le canal qui fournit l'eau à la roue, est amené par le tuyau D (fig. 219) et par la rigole E ; de là il passe dans l'auge, et en sort par une grille que montre la figure 220, pour se rendre dans une autre rigole F. Ce courant d'eau, en traversant les matières qui sont soumises à l'action des pilons, entraîne les parties déjà réduites en poussière, et les dépose plus loin, dans des bassins auxquels aboutit la rigole F.

C'est par une disposition analogue qu'on fait mouvoir les pilons de bronze qui servent à la fabrication de la poudre.

§ 159. **Sonnettes.** — Pour enfoncer des pieux dans le sol, il faut exercer sur leur tête une très-forte pression, afin de vaincre les résistances qui s'opposent à leur enfoncement. Il serait difficile de produire cette pression, en chargeant la tête du pieu d'une quantité suffisante de corps pesants : aussi a-t-on recours à des chocs, qui permettent d'exercer la pression dont on a besoin, à l'aide d'une masse beaucoup moins grande. Quand il s'agit de pieux de petite dimension, on frappe simplement sur leur tête avec de forts marteaux qu'on manœuvre à la main. Mais cela ne serait plus suffisant pour les pieux très-longs et très-gros qu'on a besoin d'enfoncer dans les grands travaux hydrauliques, tels que la construction des ponts ; on est obligé, dans ce cas, d'employer des machines nommées *sonnettes*, à l'aide desquelles on peut faire tomber un corps très-pesant sur la tête du pieu, et

produire par conséquent un choc dont l'intensité soit en rapport avec la grandeur de la résistance à vaincre.

La sonnette la plus simple est celle qui est désignée sous le nom de *sonnette à tiraude*, et que représente la figure 221. Une



Fig. 221.

masse de fonte A, nommée *mouton*, est attachée à l'extrémité d'une corde ; cette corde s'élève, passe dans la gorge d'une poulie B, redescend ensuite, et se termine par plusieurs cordons.

Des ouvriers tirent ensemble ces différents cordons, et font ainsi monter le mouton ; lorsqu'ils l'ont élevé autant que cela leur est possible, ils le laissent retomber, sans abandonner pour cela les cordons qu'ils tiennent. Le mouton est dirigé, dans son mouvement ascendant ou descendant, par deux pièces de bois verticales C, C, entre lesquelles il est obligé de se mouvoir. Ces deux montants présentent chacun une rainure, qui existe dans toute leur longueur, et dans laquelle sont engagées des oreilles qui font corps avec le mouton. De cette manière, lorsque le mouton retombe, il vient toujours frapper d'aplomb sur la tête du pieu D, si celui-ci a été convenablement installé entre les deux montants C, C.

La tête du pieu est ordinairement armée d'une frette de fer, pour éviter qu'il ne se fende sous l'action des chocs successifs.

Ce genre de sonnette présente des inconvénients, en ce que, si tous les ouvriers ne cessent pas en même temps de tirer les cordons qu'ils tiennent, ceux qui tirent les derniers peuvent être enlevés par le mouton ; il pourrait en résulter de graves accidents. Aussi, pour agir tous exactement de la même manière, les ouvriers qui manœuvrent une sonnette à tiraude ont-ils l'habitude de chanter, et de régler leurs mouvements sur leur chant. D'un autre côté, la sonnette à tiraude ne permet pas d'élever le mouton bien haut ; en sorte que, pour exercer un choc très-violent, il faut employer un mouton d'un poids considérable. C'est pour obvier à ces divers inconvénients qu'on a imaginé la *sonnette à déclic*.

§ 160. La sonnette à déclic a une disposition analogue à celle de la sonnette à tiraude. Mais au lieu que la corde se divise en plusieurs cordons qui aboutissent entre les mains d'autant d'ouvriers, elle vient s'enrouler sur un treuil à engrenages (fig. 222). Deux manivelles A, A servent à faire tourner un axe B ; cet axe porte un pignon qui engrène avec une roue fixée au treuil. En faisant tourner les manivelles, on peut faire monter le mouton aussi haut que le permet la charpente de la sonnette. Pour le laisser retomber, on peut faire glisser l'axe B dans le sens de sa longueur, de manière que le pignon se place à côté de la roue dentée, et n'engrène plus avec elle ; alors le mouton, n'étant plus retenu, tombera en entraînant la corde et faisant tourner le treuil et la roue en sens contraire du sens dans lequel on les avait fait tourner précédemment.

Pour produire ce déplacement longitudinal de l'axe B, qui supprime la communication du pignon avec la roue, on agit sur un levier CDE, qui peut tourner horizontalement autour du point D. Ce levier se termine, en E, par une fourchette qui embrasse

re B, et s'engage entre deux renflements que cet arbre pré-

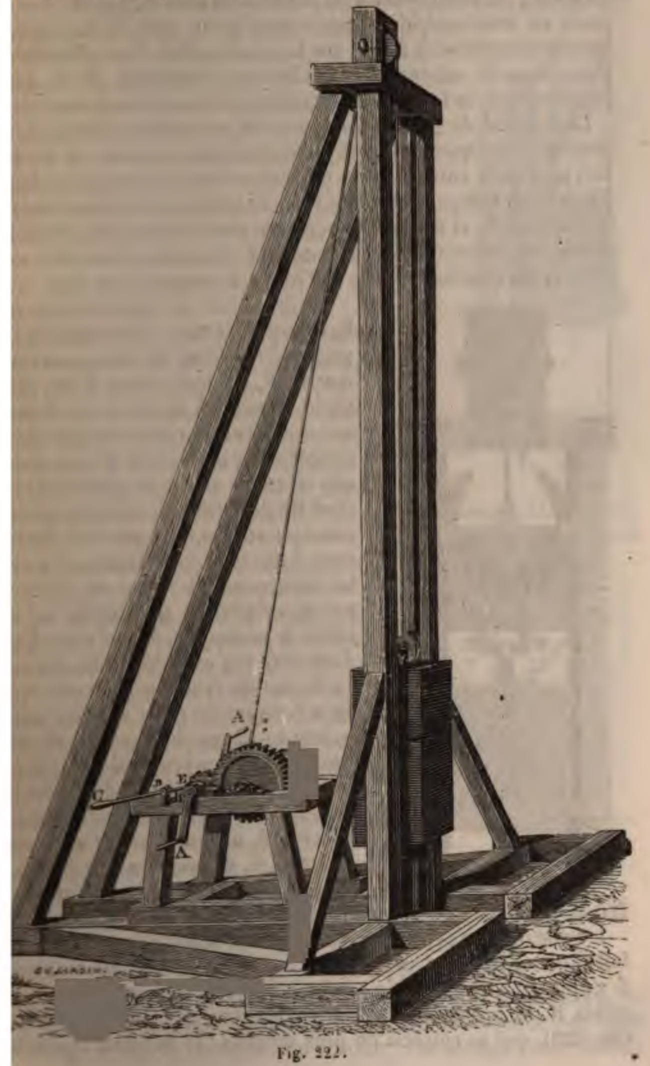


Fig. 221.

sente d'un côté et de l'autre. En faisant mouvoir l'extrémité C du levier, horizontalement et dans un certain sens, l'axe B se transporte en sens contraire, sans cesser pour cela de tourner, si les ouvriers continuent à agir sur les manivelles. Une cheville qu'on place dans le voisinage de ce levier, l'empêche de se déplacer pendant tout le temps que le pignon doit engrener avec la roue.

La rapidité de la chute du mouton, produite comme nous venons de l'indiquer, userait promptement la corde, et détériorerait le treuil, surtout si le mouton a une forte masse. Aussi, la plupart du temps, s'arrange-t-on de manière à laisser tomber le mouton seul, et à dérouler ensuite plus lentement la corde enroulée sur le treuil. Nous allons faire connaître deux dispositions différentes destinées l'une et l'autre à atteindre ce but.

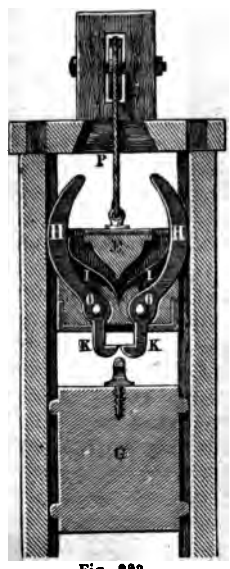


Fig. 223.

La première est représentée sur les figures 222 et 223. Elle consiste à composer le mouton de deux parties distinctes F, G, dont l'une F est directement attachée à la corde, et l'autre G, qui constitue le corps du mouton, est simplement accrochée à une pince logée dans la partie F. Les deux branches HK de cette pince peuvent tourner chacune autour d'un point O. Deux ressorts I tendent constamment à écarter les extrémités H l'une de l'autre, et par conséquent à maintenir les extrémités K en contact l'une avec l'autre; d'ailleurs ces extrémités K, terminées en forme de crochet, peuvent se loger dans l'ouverture d'un anneau qui surmonte le corps du mouton G. Si l'on vient, par un moyen quelconque, à rapprocher les extrémités H des deux branches de la pince, elle s'ouvre à sa partie inférieure, et abandonne l'anneau fixé au corps G, de sorte que ce corps peut tomber. Voici maintenant comment se fait la manœuvre de la sonnette.

L'anneau du corps du mouton étant engagé dans la pince, on fait tourner les manivelles, et le mouton s'élève. Au moment où il s'approche de la partie supérieure de la charpente, les extrémités H de la pince viennent s'engager dans une ouverture P, (fig. 223), qui se rétrécit de plus en plus; le mouton continuant

à monter, la pince est obligée de se resserrer dans le haut, en faisant fléchir les ressorts I ; elle s'ouvre vers le bas, abandonne l'anneau, et le corps du mouton tombe seul. C'est alors qu'on agit sur le levier CDE, pour supprimer la communication des manivelles avec le treuil, et la tête du mouton tombe à son tour, en entraînant la corde. Au moment où la tête du mouton vient choquer le mouton lui-même, la pince s'ouvre, en raison de la forme qu'elle présente à sa partie inférieure; l'anneau se trouve de nouveau saisi, et, en continuant à faire tourner les manivelles, on peut donner un nouveau coup de mouton.

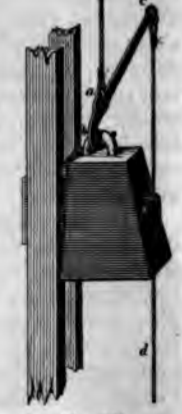


Fig. 224.

La seconde disposition est plus simple que la précédente, et plus fréquemment employée : elle est représentée sur la figure 224. La corde porte à son extrémité *a* un crochet *b* destiné à saisir l'anneau dont le mouton est surmonté. Ce crochet se prolonge au delà de son point d'attache avec la corde, jusqu'en *c*; et de ce point *c* part une seconde corde *cd*. Lorsque le mouton s'est élevé à une hauteur convenable, il suffit de tirer la corde *cd* de haut en bas, pour le faire tomber; car en agissant ainsi, on fait passer le crochet de la position *bc* à la position *b' c'*, (fig. 225), et par conséquent on décroche le mouton. La même corde *cd* sert ensuite à faire descendre le crochet, pour que l'on puisse accrocher de nouveau le mouton et recommencer l'opération. Il est aisé de voir d'ailleurs qu'il n'est pas nécessaire qu'un homme tire la corde *cd*, à l'instant où le mouton a atteint la hauteur d'où il doit tomber; on peut attacher l'extrémité libre de cette corde à un des montants de la machine, en lui laissant une longueur telle que, par suite du mouvement ascendant du mouton, elle se tende précisément au moment où le mouton doit être décroché.

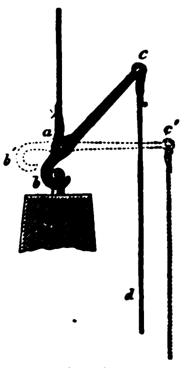


Fig. 225.

§ 161. **Machines qui servent à frapper les monnaies.** — Pour fabriquer les pièces de monnaie, on commence par faire un alliage ayant la composition voulue ; cet alliage étant fondu,

on le coule dans des lingotières, pour en faire des barres plates; puis ces barres sont laminées, jusqu'à ce que leur épaisseur soit suffisamment diminuée; ensuite, à l'aide d'emporte-pièce, on les découpe en rondelles de la dimension convenable; et enfin, après s'être assuré que les rondelles ainsi obtenues, et que l'on nomme des *flans*, ont bien le poids que doivent avoir les pièces de monnaie, on les soumet à une très-forte pression, entre des morceaux d'acier trempé, qui présentent une gravure en creux, afin de leur faire prendre le relief qu'on voit sur toute leur surface. Ce sont les machines qui servent à cette dernière opération que nous allons décrire.

Il n'y a pas bien longtemps qu'on employait encore, à l'hôtel des monnaies de Paris, le balancier monétaire inventé par M. Gingembre, et dans lequel les flans recevaient leur relief à l'aide d'un choc. Depuis quelques années ce balancier a été remplacé par la presse monétaire de M. Thonnelier, dans laquelle les flans sont frappés sans choc, et on ne l'a plus conservé que pour frapper les médailles. Nous allons faire connaître l'une et l'autre de ces deux machines, en commençant par la première.

Le balancier monétaire est représenté dans son ensemble par la figure 226. La figure 227 reproduit, à une plus grande échelle, une portion de la précédente, et la figure 228 est une coupe horizontale faite à la même échelle que la figure 227. La machine se compose essentiellement d'un massif de bronze AA, formant écrou à sa partie supérieure; d'une vis BB, qui traverse cet écrou, et d'un levier CC, fixé horizontalement, et en son milieu, à la tête de la vis. Ce levier se



Fig. 226.

termine à ses deux extrémités par deux masses lenticulaires de

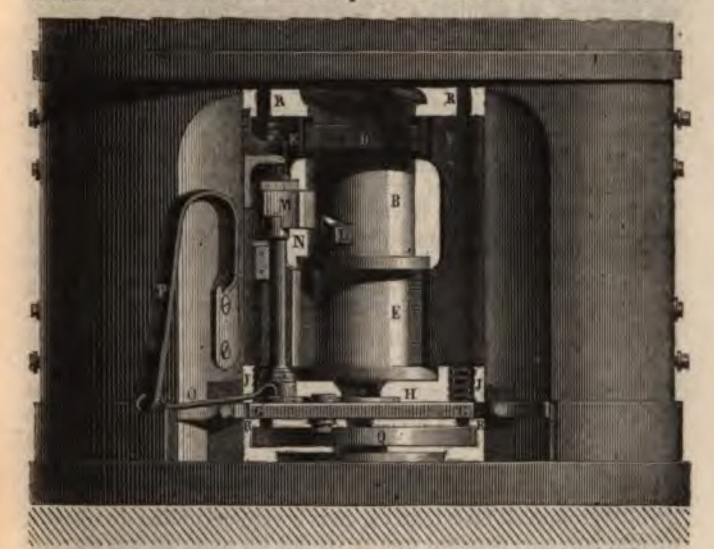


Fig. 227.

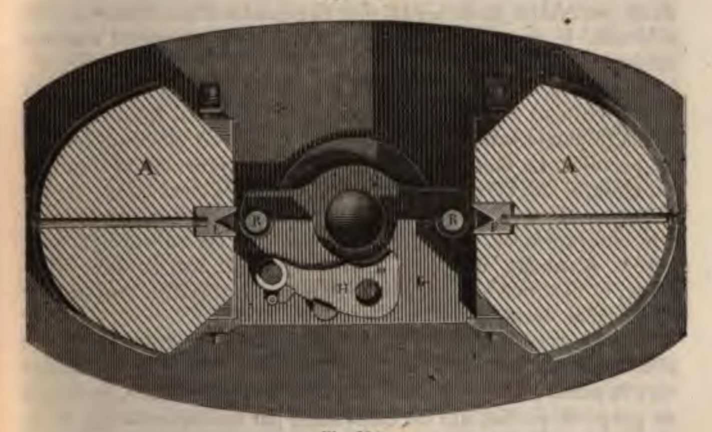


Fig. 228.

bronze, auxquelles sont attachées des lanières de cuir, qui servent

à le mettre en mouvement. Lorsqu'on agit sur le levier, à l'aide de ces lanières, de manière à le faire tourner dans un sens convenable pour que la vis descende, le mouvement se produit et s'entretient, tant que l'extrémité inférieure de la vis ne rencontre pas un obstacle qui s'oppose à ce qu'elle descende davantage. Mais aussitôt qu'un tel obstacle se présente, la vis et le levier sont obligés de s'arrêter brusquement, et il en résulte un choc qui donne lieu à une très-grande pression de l'extrémité inférieure de la vis sur le corps qui l'a subitement arrêtée.

C'est pour augmenter la violence du choc qu'on a terminé le levier CC par deux masses de bronze; voici comment on peut se rendre compte de l'effet qui en résulte. Si l'une de ces deux masses, animée de la vitesse qu'elle possède lorsque des hommes ont mis le levier en mouvement à l'aide des lanières, venait rencontrer directement un obstacle qui s'oppose à ce que son mouvement continue, elle produirait un choc dont l'intensité serait proportionnelle à la grandeur de cette masse, et aussi à la vitesse qu'elle possédait avant le choc. Si maintenant on considère la même masse produisant un choc par l'intermédiaire du levier et de la vis, on reconnaîtra aisément, d'après le § 72, que la grandeur du choc auquel elle donnera lieu sera à la grandeur du choc qu'elle produirait directement, dans le rapport même du chemin qu'elle parcourt pendant que la vis fait un tour, au pas de cette vis. On voit par là que l'addition de masses un peu grandes aux deux extrémités du levier CC doit augmenter d'une manière considérable le choc que la vis et le levier auraient exercé sans ces masses.

Les morceaux d'acier trempé, qui portent la gravure en creux des deux faces de la pièce, se nomment les *coins*. L'un d'eux est fixé à la partie inférieure de la vis, et l'autre est placé au-dessous du premier. Le flan se pose sur le coin inférieur, et, au moment du choc, il est très-fortement serré entre les deux coins, ce qui oblige sa matière à pénétrer dans toutes les cavités que présentent leurs surfaces. En même temps le flan est entouré par une espèce d'anneau ou *virole* gravée sur tout son contour intérieur, et destinée à former les lettres qui font saillie tout autour de la pièce de monnaie.

Le coin supérieur, mobile avec la vis, ne doit pas tourner avec elle, il doit seulement descendre. Pour y arriver, on a pratiqué vers la partie inférieure de la vis une rainure circulaire, en forme de gorge de poulie, qui est embrassée par un collier D (fig. 227); ce collier est fixé à une pièce EE, qu'on nomme la *boîte coulante*, et qui se termine de part et d'autre par deux biseaux pénétrant

dans deux coulisses F, F (fig. 228), dans lesquelles elle peut glisser verticalement. Lorsque la vis est mise en mouvement, elle tourne dans le collier D; celui-ci, qui ne peut pas tourner, ne fait que monter ou descendre, en entraînant la boîte coulante, suivant qu'on fait mouvoir la vis dans un sens ou dans l'autre. C'est à la partie inférieure de la boîte coulante qu'est fixé le coin supérieur.

Le coin inférieur est simplement posé sur une pièce mobile, ou rotule, qui joue un rôle important. Cette rotule, dont le dessous est convexe, remplit exactement la concavité de même forme d'une grosse masse d'acier, qui occupe le milieu de la partie inférieure du massif AA. Au moment du choc, la rotule se place dans la cavité qui la contient, de manière à rendre la face gravée du coin inférieur parallèle à celle du coin supérieur et à égaliser ainsi les pressions qui s'exercent dans les diverses parties de la surface du flan.

Si la virole qui sert à former les lettres en saillie du contour de la pièce était faite d'un seul morceau d'acier, la pièce ne pourrait pas en sortir, après avoir été frappée; elle y serait maintenue par les lettres mêmes. Aussi emploie-t-on une virole brisée, qui est formée de trois morceaux de même dimension, et réunis par juxtaposition. Le contour extérieur de ces trois parties de la virole brisée est conique, et elles sont placées à l'intérieur d'un tronc de cône creux dont la grande base est tournée vers le haut. Des ressorts qui soulèvent ces trois pièces, pour les porter dans la partie large de la cavité conique, leur permettent de s'écarter et d'abandonner la pièce qu'elles embrassent. Au moment où un nouveau flan est frappé, la virole brisée est repoussée vers le fond de la cavité conique, ce qui oblige ses trois parties à se rapprocher les unes des autres, et fait disparaître toute solution de continuité entre elles.

La machine est disposée de manière à placer elle-même le flan dans la position qu'il doit occuper pour être frappé, et à enlever la pièce aussitôt qu'elle est frappée. Ces deux opérations s'effectuent au moment où la vis B remonte. Au niveau de la face supérieure de la virole brisée, existe une table G, formée de deux parties; on a supposé, dans la figure 228, que la partie postérieure de cette table est enlevée, afin de laisser voir ce qui est au-dessous. Sur cette table se meut une pièce H, qui porte le nom de *main-poseur*, et qui est destinée à la fois à chasser la pièce qui vient d'être frappée, à l'aide de l'échancrure *m*, et à poser au milieu de la virole un flan qu'on a introduit d'avance dans le trou *n*. Pour que la pièce frappée puisse être chassée par l'échancrure *m*

de la main-poseur, il faut que cette pièce soit élevée jusqu'au-dessus de la virole brisée. A cet effet, le coin inférieur peut être soulevé par une plaque Q, à laquelle sont fixés deux tiges R, R, qui traversent librement le balancier dans toute sa hauteur, et qui aboutissent à un collier SS (fig. 226). Quand la vis B monte, les extrémités des filets poussent ce collier de bas en haut ; mais bientôt ces filets pénètrent dans des échancrures pratiquées dans le collier, qui reste stationnaire pendant tout le temps que la vis continue à monter, et maintient ainsi la plaque Q à une hauteur convenable pour que la face gravée du coin inférieur soit au niveau du dessus de la table G.

Le mouvement est donné à la main-poseur par une came L, fixée à la vis B, qui, pendant le mouvement ascendant de cette vis, vient saisir une palette M ; cette palette, appuyant sur une saillie que porte l'arbre vertical N, le fait tourner, et avec lui la main-poseur qui est attachée à sa partie inférieure. La vis continuant à monter, la came L finit par ne plus toucher la palette M que par sa surface extérieure, qui est cylindrique, la main-poseur ne tourne plus ; mais alors une saillie de la vis B soulève, en montant, l'axe N et la main-poseur ; la palette M est bientôt abandonnée par la came L, et la main-poseur est ramenée en arrière par le crochet O, que tire le ressort P. Dans ce mouvement rétrograde, la main-poseur, qui reste soulevée pendant quelque temps par la vis, passe au-dessus du flan qu'elle a déposé au centre de la virole. Lorsque la vis B redescend pour frapper le flan, la came L rencontre la palette M, qui cède sans faire tourner l'axe N, et qui est ensuite ramenée dans sa position par un ressort ; en même temps le collier SS et la plaque Q se sont abaissés, le coin inférieur est venu se reposer sur la rotule, et le flan, descendant avec ce coin, s'est placé à l'intérieur de la virole, dans la position qu'il doit occuper pour être frappé.

§ 162. La presse monétaire de M. Thonnelier, qui a été substituée au balancier que nous venons de décrire, n'en diffère essentiellement que par la manière dont se produit la compression du flan, entre les deux coins de la virole brisée. La figure 229 en représente une coupe qui montre tout le mécanisme.

Une manivelle G est fixée à l'extrémité d'un arbre, qu'une machine à vapeur fait tourner, et qui porte un volant Z. Cette manivelle agit, par l'intermédiaire de la bielle F, sur le levier H, auquel elle donne un mouvement d'oscillation autour du point fixe *a*. La partie *b* du levier s'appuie sur la tête d'une colonne I, dont l'extrémité inférieure se meut à rotule dans la boîte coulante J. La boîte coulante, qui porte le coin supérieur, se trouve à l'extré-

mité d'un levier mobile autour du tourillon c, e
ment appuyée de bas en haut, contre la colonne
de deux contre-poids N, action que transmettent le l
montant à fourchette L. Lorsque la manivelle G sou

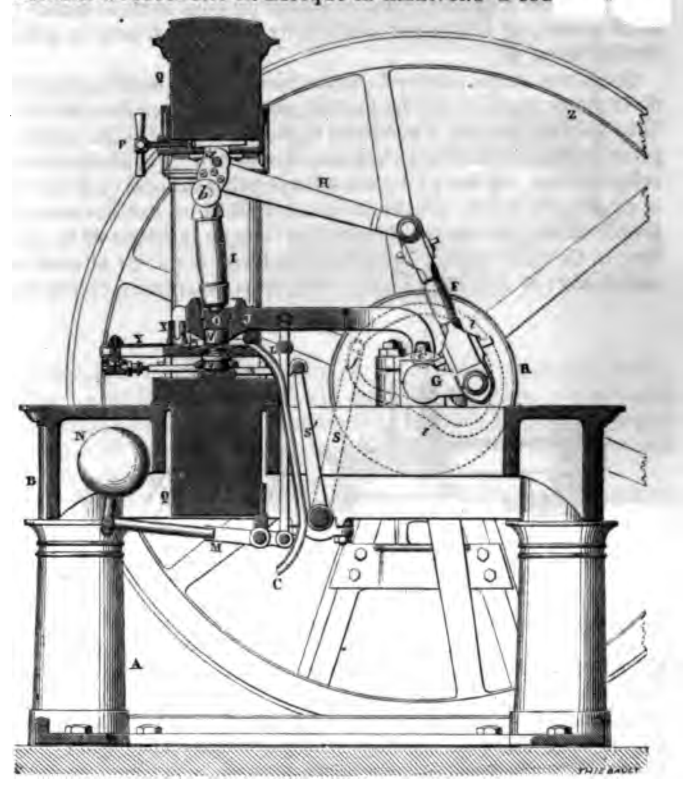


Fig. 229.

vier H, ce levier tend à abaisser la colonne I, ainsi que la boîte coulante ; si d'ailleurs les coins sont à une distance convenablement réglée l'un de l'autre, et qu'un flan ait été introduit entre eux, ce flan éprouvera une compression extrêmement grande, qui sera suffisante pour produire le même effet que le choc dans le balancier monétaire. On se fera une idée de la grandeur de la pression exercée par la colonne I, en observant combien peu descend la

boîte coulante, lorsque l'extrémité du bras de levier H s'élève d'une quantité notable (§ 72).

La distance entre les deux coins est réglée par une vis de rappel P, qui sert à enfoncer plus ou moins un coin entre le massif Q de la presse, et le tampon d'acier sur lequel se trouve le point fixe du levier H.

Quant aux autres parties du mécanisme, elles agissent à peu près de la même manière que les parties correspondantes du balancier. Voici quel en est le jeu. Un plateau R, monté sur l'arbre du volant, présente une coulisse excentrique *ii*; un bouton *j*, qui pénètre dans cette coulisse, est fixé à l'extrémité supérieure du bras de levier S, et ce bras de levier, attaché inférieurement à un axe horizontal, prend un mouvement oscillatoire, par suite de la forme de la coulisse *ii*. Ce mouvement se transmet au levier S' qui est attaché au même axe; et la tringle U (fig. 230), dont l'extrémité recourbée

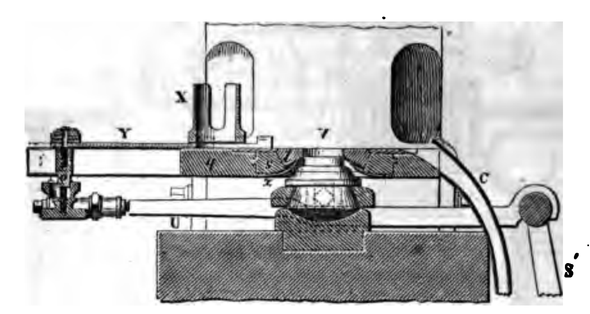


Fig. 230.

s'appuie sur le levier S', reçoit un mouvement de va-et-vient dirigé horizontalement. Dans ce mouvement de va-et-vient, lorsque la tringle U se transporte à droite, la partie inclinée, qui se trouve au milieu de sa longueur, vient soulever le coin inférieur, pour élever la pièce frappée au-dessus des bords de la virole brisée; en même temps cette tringle fait marcher, également vers la droite, la main-poseur Y, qui chasse la pièce frappée dans le conduit C, d'où elle tombe dans une corbeille, et qui dépose ensuite un flan au milieu de la virole. Ici la main-poseur Y se compose de trois parties, comme le montre la figure 231; les deux pièces latérales se rapprochent de la pièce du milieu, pour saisir le flan et le poser sur le coin V; mais dès qu'il y est posé, ces deux parties latérales s'écartent, et la main-poseur se reporte vers la gauche, en abandonnant le flan. X est un gobelet dans lequel on dépose une pile de flans, que la

main-poseur prend un à un par-dessous, pour les porter sur le coin. Les figures 230 et 231 montrent la disposition de la virole

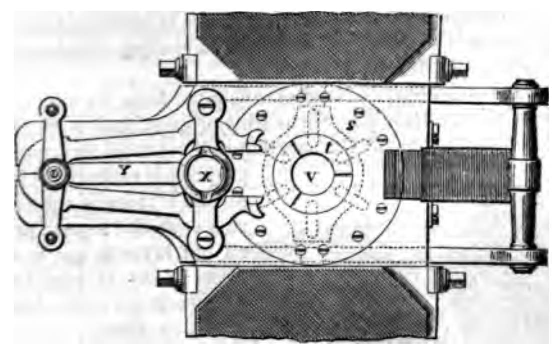


Fig. 231.

brisée, telle qu'elle a été indiquée précédemment pour le balancier : q est le porte-virole; s le cercle de la virole, qui présente intérieurement une cavité conique ; t la virole brisée en trois parties ; x les ressorts qui servent à tenir la virole brisée ouverte et à fleur du porte-virole.

Les figures 229, 230 et 231 se rapportent à la presse monétaire, telle qu'elle a été construite par M. Thonnelier ; plusieurs modifications ont été apportées aux parties accessoires de cette machine, depuis qu'elle fonctionne à l'hôtel des monnaies de Paris; mais les parties essentielles, celles qui servent à exercer la pression nécessaire pour modeler les pièces de monnaie, n'ont été nullement modifiées.

La presse monétaire présente plusieurs avantages sur le balancier qu'elle a remplacé. D'abord elle permet d'exercer toujours la même pression pour frapper les flans, ce qui donne lieu à des résultats plus réguliers ; tandis que la force des hommes employés à manœuvrer le balancier présentait des irrégularités notables. D'un autre côté, si l'on oubliait de mettre un flan entre les coins du balancier, ces deux coins choquaient l'un contre l'autre et se brisaient ; tandis que, dans la presse, les deux coins ne viennent jamais en contact, lors même qu'il n'y aurait pas de flan entre eux. Un troisième avantage consiste dans la rapidité de l'opération : une presse monétaire frappe environ 60 pièces à la minute, et peut ainsi fonctionner pendant longtemps sans avoir besoin de s'arrêter ; tandis que le balancier frappait beaucoup moins de

pièces par minute, et les ouvriers avaient besoin de se reposer de temps en temps. Enfin, le gobelet X, dans lequel on met une pile de flans, dispense de l'emploi d'un ouvrier exclusivement chargé de mettre les flans dans le trou de la main-poseur.

Les balanciers sont maintenant exclusivement employés pour frapper les médailles.

§ 163. **Horlogerie.** — Nous savons que, dans un mouvement uniforme, les chemins parcourus sont proportionnels aux temps employés à les parcourir. Un pareil mouvement est éminemment propre à la mesure du temps, puisqu'il ramène cette mesure à celle de l'espace parcouru par le corps qui se meut. Aussi, dans la construction des machines destinées à mesurer le temps, a-t-on dû chercher à produire un mouvement uniforme. Mais, en y réfléchissant, on reconnaît qu'il est extrêmement difficile d'y arriver. Pour qu'une machine se meuve toujours avec la même vitesse, il faut que la puissance qui lui est appliquée fasse constamment équilibre aux résistances qu'elle a à vaincre. Si la résistance conserve toujours la même grandeur, la puissance doit agir constamment avec la même intensité; si les résistances viennent à varier, la puissance doit varier dans le même sens, et d'une quantité déterminée, pour que l'équilibre entre toutes ces forces ne soit pas troublé. Or, on conçoit, d'après le grand nombre de résistances de toute espèce qui se développent dans le mouvement d'une machine, qu'on doit rencontrer de grandes difficultés pour disposer la puissance de telle sorte qu'elle fasse équilibre à chaque instant à toutes ces résistances; et on le concevra d'autant mieux, si l'on observe que les résistances

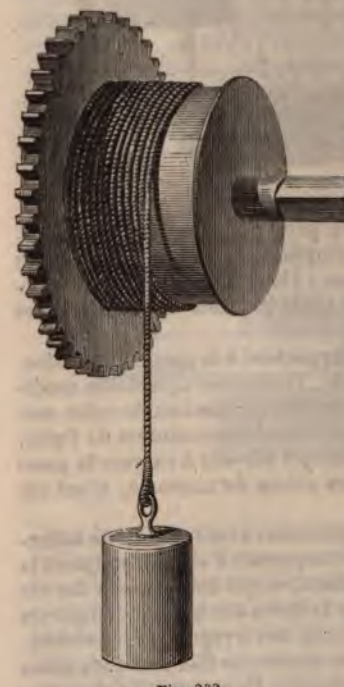


Fig. 232.

changent souvent d'un moment à l'autre, d'une manière purement accidentelle, suivant les variations de température, d'humidité, etc. Nous allons voir par quels moyens on est parvenu, non pas à lever ces difficultés, mais à les éluder en grande partie, pour atteindre le même but, dans la construction des horloges.

§ 164. Les moteurs employés pour faire mouvoir les mécanismes qui servent à mesurer le temps sont de deux espèces différentes : ce sont des poids ou des ressorts.

Pour faire agir un poids comme moteur d'une horloge, on le suspend à l'extrémité d'une corde qui est attachée sur la surface d'un cylindre horizontal, (fig. 232), et qui fait un certain nombre de tours sur cette surface. Le cylindre peut tourner autour de son axe ; le poids, qui tend constamment à descendre, lui communique un mouvement de rotation, et ce mouvement est transmis au mécanisme par une roue dentée qui est fixée au cylindre.

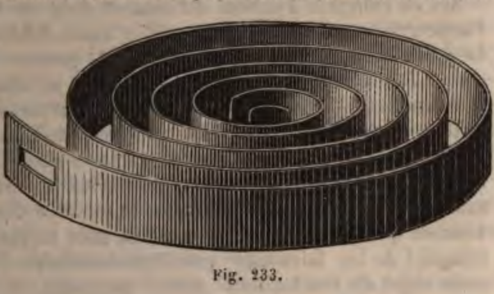


Fig. 233.

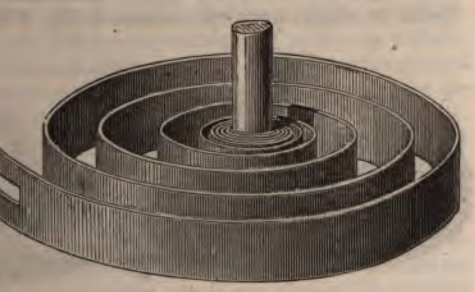


Fig. 234.

Les ressorts qu'on emploie comme moteurs, pour les mécanismes d'horlogerie, sont des lames d'acier minces et très-longues, qui ont été travaillées de manière à s'enrouler d'elles-mêmes en spirales, comme le montre la figure 233. Supposons que l'extrémité extérieure du ressort soit attachée en un point fixe, et que l'extrémité intérieure soit liée à un axe susceptible de tourner sur lui-même ; lorsqu'on fera tourner cet axe dans un sens convenable, il entrainera avec lui l'extrémité intérieure du ressort;

les spires se serreront de plus en plus sur son contour, et le ressort prendra la forme indiquée par la figure 234. Si l'on abandonne ensuite l'axe à lui-même, le ressort, qui tend à reprendre sa forme primitive, lui imprime un mouvement de rotation : c'est ce mouvement que l'on transmet au mécanisme d'horlogerie à l'aide d'engrenages. Il est clair que l'extrémité intérieure du ressort pourrait être tout à fait fixe, et que, si l'extrémité extérieure était attachée à une pièce susceptible de tourner autour de l'axe du ressort, elle communiquerait également un mouvement de rotation à cette pièce.

Si l'on compare l'action du ressort dont on vient de parler à l'action d'un poids, on verra qu'il y a une différence essentielle. Le poids moteur agit toujours avec la même intensité ; tandis que la force du ressort va constamment en diminuant, depuis le moment où il commence à agir, jusqu'au moment où il a repris sa forme primitive. L'avantage que présente l'uniformité d'action du poids ne se retrouve donc plus dans l'emploi d'un ressort, et nous verrons que cette uniformité d'action est essentielle à la marche régulière du mécanisme. Pour faire disparaître l'inconvénient que présentent les ressorts, sous ce point de vue, on a imaginé de les faire agir par l'intermédiaire d'une *fusée*, qui a pour objet de rendre leur action constante. A cet effet on enferme le ressort dans un tambour A (fig. 235), qu'on nomme le



Fig. 235.

barillet ; sur la surface de ce barillet est fixée l'extrémité d'une chaîne articulée B, qui, après avoir fait un certain nombre de tours sur cette surface, vient s'enrouler sur une sorte de tambour conique C, et s'y fixe par sa seconde extrémité. C'est ce tambour conique qui porte le nom de fusée ; il présente une rainure, en forme d'hélice, dans laquelle viennent se placer les tours successifs de la chaîne. Lorsque le ressort est complétement

tendu, la chaîne est enroulée sur toute la surface de la fusée; elle s'en détache du côté de sa petite base, et vient se terminer sur la surface du barillet, qu'elle ne touche que dans une petite longueur. Le ressort a son extrémité intérieure fixe, et son extrémité extérieure attachée à la circonférence du barillet; en se détendant, il fait tourner le barillet, et communique un mouvement de même sens à la fusée, par l'intermédiaire de la chaîne. Celle-ci se déroule sur la fusée, et s'enroule sur le barillet, et le mouvement ne cesse de se produire que lorsqu'elle s'est entièrement déroulée sur la fusée, de manière à s'en détacher du côté de la grande base. On voit que, pendant tout ce mouvement, la tension de la chaîne qui est produite par la force du ressort va constamment en diminuant; mais aussi cette tension agit sur la fusée à l'extrémité d'un bras de levier de plus en plus grand; et l'on conçoit qu'on ait déterminé la forme de la fusée de manière qu'il y ait une compensation exacte, c'est-à-dire de manière que l'action de la chaîne produise le même effet qu'une force constante appliquée à l'extrémité d'un bras de levier invariable. Le mouvement de rotation que prend la fusée, sous l'action de la chaîne, se transmet à tout le mécanisme, par l'intermédiaire de la roue D, que la fusée entraîne en tournant.

§ 165. Le moteur, quel qu'il soit, fait tourner un arbre, ainsi que nous venons de le voir; une roue dentée, mobile avec cet arbre, engrène avec une autre roue dentée plus petite, ou pignon, qui est fixée sur un second arbre parallèle au premier; ce second arbre porte à son tour une roue dentée qui engrène avec un pignon fixé à un troisième arbre de même direction; et ainsi de suite. Si la roue que porte le premier arbre a six fois plus de dents que le pignon avec lequel elle engrène, le second arbre tournera six fois plus vite que le premier; si la roue du second arbre a quatre fois plus de dents que le pignon qui lui correspond, le troisième arbre tournera quatre fois plus vite que second, et, par conséquent, vingt-quatre fois plus vite que le premier; en continuant de cette manière, on reconnaîtra que le mouvement de rotation du premier arbre se transforme dans des mouvements de rotation du 2e arbre, du 3e arbre, du 4e arbre,.... de plus en plus rapides; et le rapport des vitesses de deux arbres consécutifs sera toujours le même que celui des nombres de dents de la roue et du pignon qui transmettent le mouvement de l'un à l'autre.

§ 166. Après avoir fait connaître la disposition des rouages d'une horloge ou d'une montre, et le moteur qui met ces rouages en mouvement, il ne nous reste plus qu'à montrer comment on régularise ce mouvement, de manière à faire mouvoir uniformé-

ment, sur un cadran, une ou plusieurs aiguilles destinées à servir d'indicateur pour la mesure du temps.

Nous avons dit que, pour rendre le mouvement uniforme, il fallait établir un équilibre permanent entre la puissance et l'ensemble des résistances. On y parvient en adaptant au dernier arbre du mécanisme, à celui dont la vitesse est la plus grande, des palettes qui viennent choquer l'air pendant leur mouvement. La figure 236 indique la disposition qu'on donne habituellement à ces palettes : elles sont au nombre de deux, directement opposées l'une à l'autre, et formées simplement d'une plaque mince rectangulaire A, qui est traversée au milieu de sa largeur par l'axe avec lequel elle doit tourner. La résistance que l'air leur oppose varie proportionnellement au carré de leur vitesse (§ 130). Il en résulte que lorsque le mouvement commence à se produire, la résistance qu'éprouvent ces palettes est très-faible ; la force du moteur est trop grande pour qu'il y ait équilibre, et par suite la vitesse de toute la machine augmente. L'accélération du mouvement détermine un accroissement de la résistance éprouvée par les palettes, et la machine atteint bientôt une vitesse telle, que la puissance fait équilibre aux résistances ; dès lors le mouvement ne se modifie plus ; il reste uniforme, tant que la puissance conserve la même intensité.



Fig. 236.

La nature de la résistance employée ici, pour arriver à un mouvement uniforme, présente un avantage important, qui consiste en ce que sa grandeur dépend de la vitesse du mouvement. Si, par une cause quelconque, la vitesse était trop grande, les résistances l'emporteraient sur la puissance, et le mouvement se ralentirait ; si, au contraire, la vitesse était trop faible, la puissance l'emporterait à son tour sur les résistances, et le mouvement s'accélérerait. Ainsi l'emploi de la résistance de l'air, pour régulariser le mouvement d'un mécanisme d'horlogerie, ne permet pas seulement d'obtenir un mouvement uniforme, mais encore elle fait que ce mouvement ne peut avoir lieu qu'avec une vitesse déterminée. Il n'en serait pas de même, si les résistances et la puissance étaient toutes indépendantes de la vitesse du mouvement : l'équilibre entre toutes ces forces ferait que le mouvement

de la machine serait uniforme, mais ne détermin[e] manière la vitesse de ce mouvement, qui pourrait mo[...] ment être lent ou rapide.

D'après ce qui vient d'être dit, la vitesse déterminée q[...] un mécanisme d'horlogerie, dont le mouvement est [...] par la résistance de l'air, dépend de la grandeur de la [...] puisque le mouvement ne devient uniforme que lorsq[...] tance opposée par l'air aux palettes, jointe aux autres passives, est capable de faire équilibre à cette puissance [...] le mouvement s'entretienne pendant un certain temp[...] vitesse invariable, il faut donc que la puissance agiss[e] tout ce temps avec la même intensité. C'est ce qui [...] l'on se sert d'un poids comme moteur; mais si l'on [...] ressort, il sera nécessaire de le faire agir par l'i[...] d'une fusée.

Quoique le moyen qui vient d'être indiqué, pour [...] mouvement, paraisse excellent, il ne fournit cepe[...] mouvement assez régulier pour pouvoir servir à la [...] temps. La masse d'air, que les palettes rencontrent e[...] ne se présente pas toujours à elles dans des conditions [...] ment les mêmes; le moindre courant qui existe dans [...] ronnant modifie la manière dont elles sont retardées da[...] mouvement. D'un autre côté, le moindre changement qui arrive dans la grandeur de la puissance, et dans les frottements des diverses pièces les unes sur les autres, trouble l'équilibre, et la vitesse varie de manière à le rétablir, en faisant varier en conséquence la résistance qu'éprouvent les palettes de la part de l'air. Aussi n'emploie-t-on de pareils mécanismes, dont le mouvement est régularisé par la résistance de l'air, qu'à des usages pour lesquels on n'a pas besoin d'une régularité aussi parfaite que pour la mesure du temps. On s'en sert pour les tournebroches, pour faire mouvoir des pompes dans les lampes Carcel, pour faire tourner les figures de cire qui sont exposées dans les boutiques des coiffeurs, etc. On s'en sert encore lorsqu'on a besoin de produire un mouvement uniforme de courte durée, comme dans l'appareil de M. Morin, destiné à l'étude des lois de la chute des corps (§ 91). C'est aussi un mécanisme de cette espèce qui est employé dans les horloges, pour la partie de la machine qu'on appelle la *sonnerie*. Dans les anciens tournebroches, on se servait d'un poids comme moteur, et la vitesse restait toujours sensiblement la même. Mais dans la plupart des cas qui viennent d'être cités, le moteur est un ressort qui agit directement sur les rouages, et le mouvement, tout en étant régulier à un moment quel-

conque, se ralentit peu à peu, jusqu'à ce qu'il s'arrête tout à fait.

§ 167. Ne pouvant produire, par le moyen qui vient d'être indiqué, ni par aucun autre, un mouvement assez uniforme pour servir à la mesure du temps, on est obligé de se contenter d'un mouvement périodiquement uniforme, dont la réalisation, tout en présentant aussi de grandes difficultés, peut cependant être obtenue d'une manière plus complète. A cet effet, on emploie une pièce particulière, qui oscille régulièrement, et qui, à chaque oscillation, arrête entièrement le mouvement des rouages. De cette manière le mouvement est intermittent, et les aiguilles qui servent à marquer le temps sur un cadran, au lieu de tourner avec continuité, ne marchent que par saccades ; mais la quantité dont elles se déplacent à chaque fois est ordinairement si faible, que l'œil ne peut s'en apercevoir, et que leur mouvement présente, en définitive, les apparences d'un mouvement continu extrêmement lent. Ce n'est que lorsqu'une aiguille marche assez rapidement sur un cadran, comme les aiguilles qui marquent les secondes, que ce mouvement discontinu devient sensible.

La pièce oscillante dont nous venons de parler, et dont les oscillations doivent servir à arrêter périodiquement le mouvement des rouages, porte le nom de *régulateur*. Les pièces qui sont destinées à établir une liaison entre les rouages et le régulateur, par l'intermédiaire desquelles celui-ci arrête à chaque instant le mouvement produit par le moteur, constituent ce que l'on nomme l'*échappement*.

§ 168. Le premier régulateur qui ait été employé pour les horloges et les montres consiste en une roue métallique, massive à sa circonférence, et mobile autour d'un axe sur lequel elle est fixée en son centre. Cette roue, espèce de petit volant, qu'on désigne sous le nom de *balancier*, ne prend pas d'elle-même un mouvement d'oscillation autour de son axe, après qu'on lui a donné une impulsion initiale ; mais ces oscillations sont produites par l'action du moteur lui-même, action qui se transmet par l'intermédiaire des rouages et de l'échappement. C'est ce que fera bien comprendre la figure 237, qui est destinée à montrer en même temps la disposition générale d'une montre : elle a été construite en écartant les roues les unes des autres, dans le sens de la hauteur, et en plaçant leurs axes sur un même plan, afin de faire voir d'une manière plus nette tous les détails de cette disposition.

Le ressort A, dont l'extrémité extérieure est fixe, tend à faire tourner l'axe auquel est attachée son extrémité intérieure. Cet axe porte une roue à rochet B, qui agit sur la roue dentée C, par l'intermédiaire du doigt *o*. La roue C fait tourner le pignon D, et par

suite la roue E : celle-ci fait tourner le pignon F, et la ro[illegible]; la roue G communique son mouvement au pignon H, et [illegible]e de ce pignon fait tourner la roue M, par l'intermédiaire de la roue K

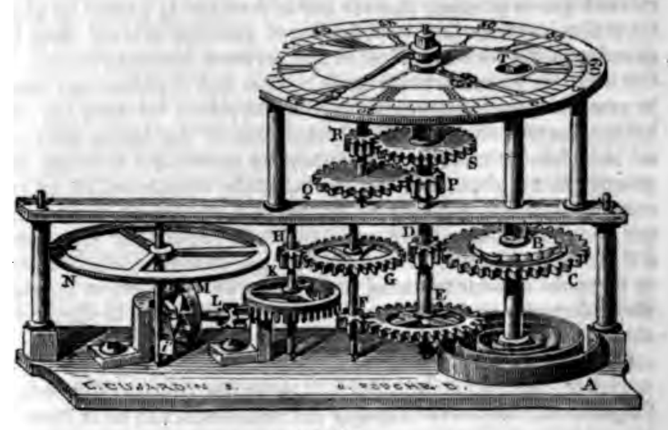


Fig. 257.

et du pignon L, qui font fonction de roues d'angle. En avant de la roue M, qui porte des dents d'une forme particulière, passe l'axe du régulateur N ; cet axe est muni de deux palettes *i, i'*, dirigées à angle droit l'une sur l'autre, et placées en regard de la partie supérieure et de la partie inférieure de la roue M, de manière à pouvoir être rencontrées par les dents de cette roue, qui porte le nom de *roue de rencontre*. Lorsque la roue tourne, ses dents viennent alternativement choquer les deux palettes *i, i'*. La palette *i* reçoit une impulsion qui la fait mouvoir de l'avant à l'arrière. Mais bientôt l'autre palette *i'* vient se mettre sur le chemin d'une dent de la roue M : elle en reçoit une impulsion qui la ramène en avant. La palette *i* se trouve alors de nouveau placée de manière à être rencontrée par les dents de cette roue ; elle est repoussée en arrière, et ainsi de suite.

L'échappement est ici formé de la roue de rencontre M, et des deux palettes *i, i'* ; on le nomme *échappement à recul*, parce que, chaque fois qu'une des palettes vient choquer une des dents de la roue, le balancier, qui n'a pas encore perdu tout son mouvement, fait reculer la roue d'une certaine quantité. Le mouvement n'est régularisé que d'une manière imparfaite par l'emploi du balancier et de l'échappement à recul. Chaque mouve-

ment que prend le balancier lui est communiqué par l'action d'une dent de la roue de rencontre sur une des palettes, et ce mouvement s'effectue avec une rapidité plus ou moins grande, suivant que la pression exercée par la dent sur la palette est plus ou moins intense. Les variations qui peuvent arriver dans la grandeur de la force motrice, et qui arrivent nécessairement si l'on emploie un ressort sans fusée ; celles qui se présentent dans la grandeur des frottements des diverses pièces les unes sur les autres, surtout en raison de l'épaississement des huiles dont on est obligé de les enduire, sont autant de causes qui font que les palettes ne reçoivent pas toujours la même impulsion, et qu'en conséquence les oscillations successives du balancier ne sont pas de même durée. Pour que l'espèce de régulateur qui vient d'être indiqué puisse être employé, il est de toute nécessité que la force du moteur soit aussi constante que possible, et que les divers frottements qui se produisent pendant toute la durée du mouvement présentent une grande uniformité.

§ 169. La figure 237 fait voir de quelle manière les rouages font marcher, sur un même cadran, et avec des vitesses différentes, l'aiguille des heures et l'aiguille des minutes. L'axe de la roue E se prolonge, et c'est à son extrémité qu'est fixée l'aiguille des minutes. Il faut donc que le ressort moteur et le régulateur soient disposés de manière que cet axe fasse un tour entier en une heure. Sur ce même axe est monté un pignon P, qui engrène avec une roue Q; et l'axe de la roue Q porte un pignon R, qui engrène avec une roue S. Cette dernière roue est fixée à un cylindre creux, dans lequel passe librement l'axe de l'aiguille des minutes, et c'est à l'extrémité de ce cylindre creux qu'est adaptée l'aiguille des heures. De cette manière les deux aiguilles se meuvent circulairement autour d'un même centre, et cependant elles ne sont pas animées du même mouvement. Le pignon P a 8 dents, et la roue Q, 24 ; l'aiguille des minutes fait donc trois tours, pendant que la roue Q en fait un. D'un autre côté, le pignon R a 8 dents, et la roue S en a 32 ; en sorte que la roue Q fait quatre tours, pendant que la roue S en fait un. La roue S fait donc un tour pendant que l'aiguille des minutes en fait douze, et par suite le cylindre creux qui sert d'axe à cette roue S est bien propre à conduire l'aiguille des heures.

L'ensemble des quatre roues et pignons P, Q, R, S, avec les deux aiguilles des heures et des minutes, est mis en mouvement par le seul axe de la roue E. La communication du mouvement de cet axe, à toute cette partie du mécanisme qui est immédiatement au-dessous du cadran, s'effectue d'une manière telle qu'on

puisse cependant faire marcher les aiguilles sans que la roue E tourne. A cet effet, au lieu d'un seul axe portant la roue E, les pignons D et P, et l'aiguille des minutes, il y en a deux placés l'un au bout de l'autre, et dont l'un porte la roue E et le pignon D, et l'autre porte le pignon P et l'aiguille des minutes. L'un de ces deux axes est creux à son extrémité, et l'autre axe pénètre à frottement dans cette cavité ; en sorte que l'un des deux axes venant à tourner par une cause quelconque, l'autre tournera en même temps, à moins qu'il n'éprouve une résistance capable de vaincre le frottement qui se développe entre eux. Lorsque la roue E tourne, elle entraîne le pignon P, et par suite les aiguilles, qui ne présentent qu'une faible résistance. Mais si au contraire on veut mettre les aiguilles à l'heure, en faisant tourner directement l'aiguille des minutes, l'axe de cette aiguille n'entraînera pas l'axe de la roue E dans son mouvement, à cause de la résistance opposée par tout le mécanisme, qui devrait se mouvoir en même temps que la roue E. L'aiguille des minutes ne fait tourner avec elle que les roues et pignons P, Q, R, S et l'aiguille des heures ; et tous les autres rouages restent en repos.

§ 170. Le ressort, qui met tout le mécanisme en mouvement (fig. 237), ne peut pas agir indéfiniment ; lorsqu'il est détendu, il est nécessaire qu'on le tende de nouveau, pour que le mouvement continue : c'est ce qu'on appelle *remonter* l'horloge ou la montre. Pour tendre le ressort A, on adapte une clef à l'extrémité carrée T de l'axe auquel il est attaché intérieurement, et l'on fait tourner cet axe dans un sens contraire à celui dans lequel l'action du ressort le fait habituellement tourner. Si la roue C était fixée à cet axe, elle tournerait avec lui, pendant qu'on tendrait le ressort, et elle entraînerait nécessairement tout le mécanisme, y compris les aiguilles, dans ce mouvement rétrograde. Pour que cela n'ait pas lieu, on fait agir l'axe du ressort moteur sur la roue C, par l'intermédiaire d'une roue à rochet B, et d'un doigt *o*, sur lequel appuie constamment un petit ressort de pression. De cette manière la roue C n'est entraînée par l'axe que lorsque celui-ci cède à l'action du ressort moteur ; et lorsqu'on fait tourner cet axe en sens contraire, pour remonter le ressort, il n'entraîne que la roue à rochet B, dont les dents passent successivement sous le doigt *o*, en faisant entendre un bruit que tout le monde connaît. Par suite de cette disposition, les roues et les aiguilles restent immobiles pendant toute la durée du remontage.

§ 171. Revenons maintenant à l'étude des régulateurs. L'emploi d'un pendule, pour régulariser le mouvement d'une hor-

loge, a été imaginé par Huyghens, en 1656. C'est à ce régulateur qu'est due la grande précision avec laquelle les horloges bien construites marquent le temps. Quels que soient les soins qu'on mette à disposer le mécanisme, de manière que le régulateur soit soumis à des actions constantes de la part du moteur, on ne peut jamais y arriver qu'imparfaitement ; il est donc très-important que le régulateur soit d'une telle nature, que la durée de ses oscillations ne soit pas influencée par la variation de ces actions. Or c'est précisément ce qui arrive pour le pendule, dont les oscillations, pourvu qu'elles soient petites, ont une durée indépendante de leur amplitude. Si l'amplitude des oscillations du pendule, employé comme régulateur, se trouve tantôt augmentée, tantôt diminuée par l'effet du moteur, leur durée n'en restera pas moins toujours à très-peu près la même, et par suite le mouvement de l'horloge sera convenablement régularisé. Ce n'est cependant pas une raison pour négliger de rendre l'action du moteur sur le régulateur aussi uniforme que possible, lorsque l'on veut arriver à un très-grand degré de perfection dans la mesure du temps.

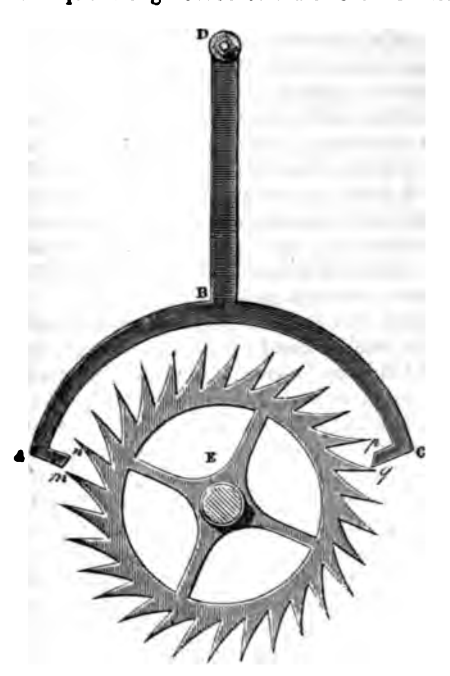


Fig. 238.

L'échappement qu'on emploie habituellement pour faire communiquer les rouages d'une horloge au pendule régulateur, est l'*échappement à ancre*, que nous allons décrire, et qui est représenté par la figure 238. Une pièce ABC en forme d'ancre, st suspendue à un axe horizontal D, et peut librement tourner

autour de cet axe. Cette ancre reçoit du pendule un mouvement oscillatoire autour de son axe de suspension. Entre ses deux extrémités A et C se trouve une roue E, qui est fixée au dernier arbre du mécanisme de l'horloge, et à laquelle le moteur tend constamment à donner un mouvement de rotation. Les dents de cette roue viennent alternativement s'appuyer sur la face inférieure de la partie A de l'ancre, et sur la face supérieure de la partie C. Ces deux faces sont d'ailleurs taillées suivant des arcs de cercle concentriques à l'axe D ; en sorte que, pendant tout le temps qu'une dent de la roue E est arrêtée par l'une des extrémités de l'ancre, cette dent, et par suite la roue, reste complétement immobile. C'est le contraire de ce qui avait lieu dans l'échappement à recul, où chaque dent de la roue de rencontre se mouvait constamment, pendant qu'elle était en contact avec la palette qui l'empêchait de passer.

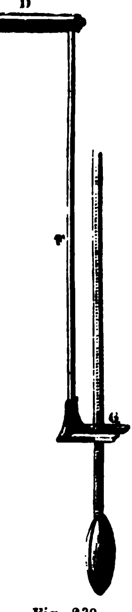


Fig. 239.

Les deux extrémités A et C de l'ancre présentent, du côté de la roue, deux parties *mn*, *pq*, inclinées en sens contraires, sur lesquelles les dents de la roue doivent glisser avant d'échapper. Au moment où ce glissement se produit, la dent exerce sur l'ancre une pression qui tend à augmenter sa vitesse, et l'ancre réagit de son côté sur le pendule pour entretenir son mouvement. Sans la présence de ces deux petits plans inclinés, l'amplitude des oscillations du pendule décroîtrait progressivement, en raison des résistances occasionnées par l'air et le mode de suspension du pendule, et aussi en raison de celles qui proviennent du frottement de la roue d'échappement sur les faces de l'ancre : ces résistances rendraient, au bout de peu de temps, les oscillations du pendule assez petites pour que les dents de la roue E n'échappassent plus, et l'horloge s'arrêterait.

La figure 239 montre de quelle manière l'ancre est mise en communication avec le pendule. L'axe horizontal D, auquel elle est fixée, porte à un bout une tige F, qui se termine inférieurement par une fourchette horizontale G. La tige du pendule passe entre les branches de cette fourchette : en sorte que le pendule ne peut pas osciller, sans que l'ancre oscille en même temps.

Dans l'échappement à recul, le moteur agissait constamment sur le régulateur pour modifier son mouvement. Il n'en est pas de même dans l'échappement à ancre, où l'influence du moteur sur le régulateur a disparu en grande partie ; cette influence n'existe plus que dans le frottement des dents de la roue d'échappement sur les faces de l'ancre, frottement qu'on peut rendre presque nul, et dans les impulsions que l'ancre reçoit des dents, au moment où elles échappent. Si l'on joint à cela la propriété précieuse du pendule, qui a été rappelée plus haut, on comprendra comment on a pu atteindre au degré de perfection que présentent maintenant les horloges pour la mesure du temps.

La durée que doit avoir chaque oscillation du pendule qui sert de régulateur à une horloge est déterminée par la liaison qui existe entre l'aiguille des minutes et la roue d'échappement. Pour qu'on puisse régler une horloge, c'est-à-dire l'empêcher d'aller trop vite ou trop lentement, il est nécessaire qu'on puisse modifier le pendule, afin de l'amener à effectuer ses oscillations dans un temps convenable. Pour cela, on ne fixe pas la lentille du pendule à sa tige ; elle est simplement traversée par cette tige, et soutenue par un écrou, qui est vissé sur la tige, et qu'on peut faire monter plus ou moins. Lorsque l'horloge va trop vite, cela vient de ce que les oscillations du pendule ont une trop courte durée ; on les allonge en abaissant la lentille. Si au contraire l'horloge va trop lentement, on relève la lentille. Dans les pendules de cheminée, on a adopté une disposition un peu différente : la lentille est fixée à sa tige, et le tout est suspendu à un fil de soie, qu'on allonge ou qu'on raccourcit, suivant que la pendule avance ou retarde.

§ 172. Les figures 240 et 241 montrent la disposition d'une horloge dont le mouvement est régularisé par un pendule et un échappement à ancre. Le poids moteur A agit à l'extrémité d'une corde qui est enroulée sur le cylindre B ; il tend à faire tourner ce cylindre, et par suite la roue C ; cette roue C engrène avec un pignon D, dont l'axe porte une deuxième roue E ; le pignon F engrène avec la roue E, et sur son axe est fixée une troisième roue G ; cette troisième roue engrène à son tour avec le pignon H, sur l'axe duquel se trouve une quatrième roue K ; enfin la roue K engrène avec le pignon L, dont l'axe porte la roue d'échappement M. L'ancre NN, mobile autour de l'axe O, embrasse la partie supérieure de la roue M. L'axe O (fig. 241) porte une tige S qui se termine inférieurement par une fourchette T ; la tige UU' du pendule, dont V est la lentille, passe entre les

ranches de la fourchette T. Le pendule est suspendu par deux mes de ressort X, X, qui fléchissent dans un sens ou dans l'au-te, à mesure qu'il oscille.

Le pendule ayant une longueur telle que la durée de chacune le ses oscillations soit précisément d'une seconde, c'est sur l'axe *a* le la roue d'échappement (fig. 241), qu'est fixée l'aiguille des

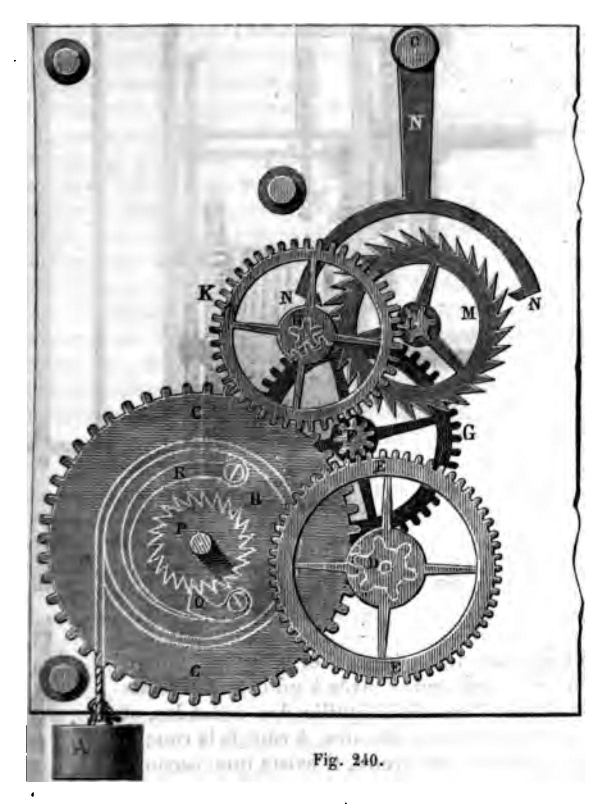


Fig. 240.

econdes. La roue d'échappement porte trente dents, et comme faut deux oscillations du pendule pour qu'une dent vienne rendre la place de la précédente, il s'ensuit que l'aiguille es secondes fait un tour entier en 60 secondes ou une mi-ute. Le pignon H, *porté par l'axe b* de la roue K, se pro-

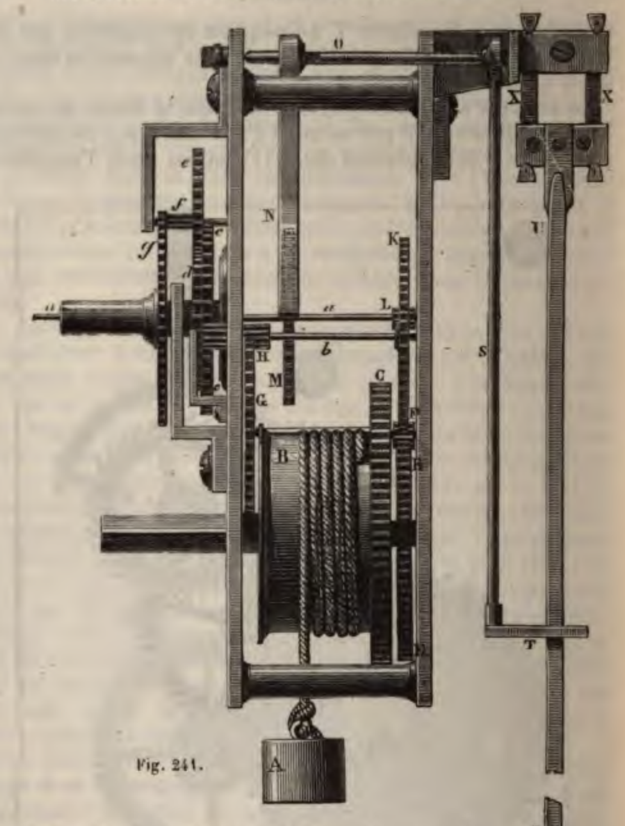


Fig. 241.

longe à gauche de la figure, et le prolongement engrène avec une roue *c*, fixée à un cylindre creux qui enveloppe l'axe de l'aiguille des secondes, et qui porte l'aiguille des minutes. A côté de la roue *c*, et sur le même axe creux, il existe une seconde roue *d*, qui engrène avec une roue *e*; l'axe de la roue *e* porte un pignon *f*, qui engrène avec la roue *g*; cette roue *g* est fixée à une second axe creux, qui enveloppe le précédent et qui porte l'aiguille des heures.

Lorsque le poids moteur a fait dérouler, en descendant,

toute la corde qui était enroulée sur le cylindre B, il ne peut plus continuer à agir, à moins qu'on n'enroule de nouveau la corde, en faisant remonter le poids. Pour cela, on fait tourner le cylindre B dans un sens convenable, à l'aide d'une clef. Tous les rouages seraient entraînés dans ce mouvement rétrograde, si l'on avait pas adapté au cylindre un appareil semblable à celui que nous avons déjà vu sur la figure 237, et qui était destiné à remplir le même objet. Une roue à rochet P (fig. 240), est fixée à l'axe du cylindre B, et tourne nécessairement avec ce cylindre, dans quelque sens qu'il se meuve. Un doigt Q s'engage entre les dents de la roue P, et un ressort R maintient ce doigt constamment appuyé sur la roue. Le ressort et le doigt sont attachés à la roue dentée C. Lorsque le cylindre B tourne sous l'action du poids moteur A, il fait tourner la roue C, par l'intermédiaire de la roue à rochet et du doigt ; mais lorsqu'on fait tourner le cylindre en sens contraire, pour remonter le poids, les dents de la roue à rochet passent successivement sous le doigt, et la roue C ne tourne pas.

§ 173. Les avantages que présente l'emploi d'un pendule, comme régulateur, sont exclusivement réservés aux horloges fixes, car il est bien clair que les mouvements divers, souvent brusques, que doivent recevoir les horloges portatives ou montres, troubleraient complétement les oscillations du pendule et le jeu de l'échappement. On a donc été obligé d'imaginer pour les montres un régulateur spécial, qui ne fût pas incompatible avec la mobilité de la machine tout entière, et qui présentât en même temps, autant que possible, les avantages du pendule. Le balancier régulateur, décrit précédemment (§ 168), satisfait bien à la première condition ; mais il est loin de satisfaire à la seconde. Nous avons vu en effet que ce régulateur, n'oscillant pas de lui-même, mais recevant toujours la totalité de son mouvement du moteur, devait conserver dans ses oscillations la trace des variations de la force que le moteur transmet aux palettes. C'est encore Huyghens qui a imaginé le régulateur qui est exclusivement employé pour les montres.

Ce régulateur n'est autre chose que le balancier dont on vient de parler, muni d'un ressort spiral qui lui donne la propriété d'osciller de lui-même, sans avoir besoin pour cela de l'action du moteur. Ce ressort, que l'on nomme simplement le *spiral*, a la même forme que le ressort moteur décrit précédemment et représenté par la figure 233, mais il est beaucoup plus délié, et a par conséquent beaucoup moins de force. Son extrémité intérieure est attachée à l'axe du balancier, comme le montre la figure 242, et son autre extrémité est fixée à une des platines de la montre. Le

spiral prend naturellement une certaine forme d'équilibre. Lorsqu'on fait tourner le balancier, soit dans un sens, soit dans l'autre, le spiral se trouve déformé; en vertu de son élasticité, il tend à reprendre la figure qu'il avait précédemment, et ramène le balancier vers sa position primitive. Mais, au moment où le spiral a repris exactement sa figure d'équilibre, le balancier est animé d'une vitesse en vertu de laquelle il continue à tourner dans le même sens; le spiral se déforme donc en sens contraire, et oppose au balancier une résistance croissante, qui finit bientôt par le réduire au repos. Alors le spiral, en continuant à agir sur le balancier, le ramène de nouveau à sa position primitive; celui-ci la dépasse, et ainsi de suite. Le balancier muni du spiral, après avoir été dérangé de sa position d'équilibre, oscille donc de part et d'autre de cette position, de la même manière qu'un pendule oscille de part et d'autre de la verticale. On peut dire que le spiral est au balancier ce que la pesanteur est au pendule. Il est en outre très-important d'observer que la durée des oscillations du balancier est indépendante de leur amplitude, pourvu que le spiral soit convenablement construit.

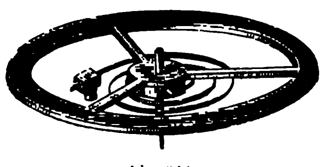


Fig. 242.

§ 174. Il ne suffit pas que les durées des oscillations libres du balancier muni d'un spiral soient indépendantes de leur amplitude, pour que l'application d'un pareil balancier à un mécanisme d'horlogerie en régularise complétement le mouvement; il faut encore que l'échappement soit tel que le balancier soit soustrait, autant que possible, à l'action du moteur, action qui modifierait inégalement la durée des oscillations, suivant qu'elle serait plus ou moins énergique.

On a employé pendant longtemps, et l'on emploie encore, dans les montres communes, l'échappement à recul, ou à palettes, que nous avons déjà vu dans la figure 237. Dans ce cas la partie du mécanisme qui sert à régulariser le mouvement est exactement disposée comme l'indique cette figure, avec cette différence cependant que l'axe du balancier est muni d'un spiral. La régularité du mouvement obtenu de cette manière est bien plus grande qu'elle n'était avant l'emploi du spiral; mais elle laisse encore beaucoup à désirer. Le balancier seul a été perfectionné par l'addition du spiral; l'échappement a besoin d'être modifié à son tour. Nous allons voir en quoi consistent les deux échappe-

ments principaux qu'on a subsitués à l'échappement à recul, et qui ont permis d'arriver à une grande perfection dans la mesure du temps par les montres.

Le premier dont nous parlerons est l'*échappement à cylindre*, qui est appliqué dans toutes les montres plates. L'axe du balancier, au lieu de porter deux palettes, comme dans l'échappement à recul, est taillé d'une manière particulière, dans une portion de sa longueur. La figure 243 montre la forme qu'on

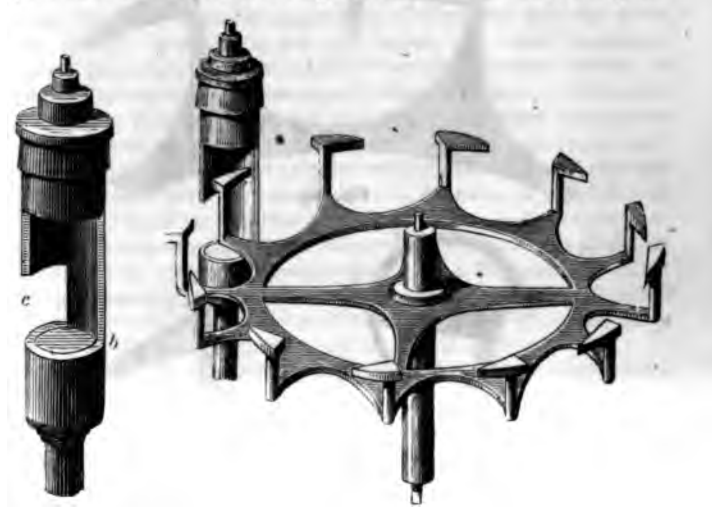


Fig. 243. Fig. 244.

lui donne. La partie *ab* a été réduite à un demi-cylindre évidé; et, en outre, une échancrure *c* a été pratiquée dans ce demi-cylindre. C'est la partie demi-cylindrique, située au-dessus de cette échancrure, qui joue le rôle le plus important. La dernière roue du mécanisme, celle qu'on nomme roue d'échappement, est placée dans un plan perpendiculaire à l'axe du balancier, et ses dents, qui s'élèvent au-dessus de sa surface, viennent s'engager dans le cylindre évidé que porte cet axe (fig. 244). Les figures 245 et 246 font voir de quelle manière le cylindre arrête et laisse passer successivement les dents de la roue. En vertu des oscillations du balancier, le cylindre A tourne autour du centre B, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Une dent C vient buter par sa pointe contre la surface extérieure du cylindre (fig. 245);

mais bientôt ce cylindre a pris une autre position (fig. 246), et la dent C, qui a pu marcher sous l'action du moteur, vient buter de nouveau contre la face intérieure du cylindre ; le cylindre, repre-

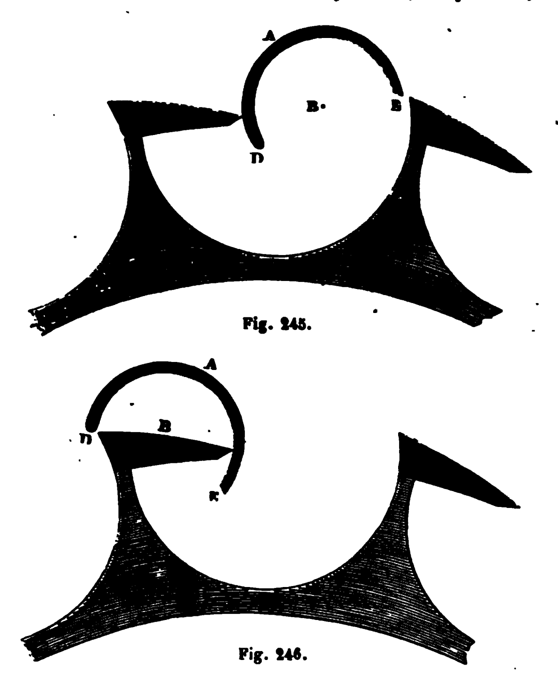


Fig. 245.

Fig. 246.

nant ensuite sa première position, laisse échapper la dent C, et arrête la dent suivante par sa surface extérieure, et ainsi de suite.

Dans cet échappement, tant qu'une dent est arrêtée sur l'une des deux faces du cylindre, elle ne tend, en aucune manière, à le faire mouvoir dans un sens ou dans l'autre ; le cylindre oscille sous la seule action du spiral. Cependant le frottement qu'il éprouve de la part des dents qu'il arrête, joint aux autres résistances qui s'opposent au mouvement du balancier, tend à diminuer l'amplitude de ses oscillations ; et la montre cesserait bientôt de marcher, si le moteur ne restituait de temps en temps au balancier le mouvement que ces résistances lui font perdre. C'est pour cela qu'on donne aux dents la forme qu'elles présentent extérieurement ; au moment où la dent C, après avoir

glissé sur la face extérieure du cylindre (fig. 245), commence à échapper, sa convexité pousse le bord D, et accélère ainsi le mouvement du balancier. C'est encore pour la même raison que l'autre bord E du cylindre est taillé en biseau ; lorsque l'extrémité de la dent atteint ce bord, elle glisse sur la petite face oblique, et donne une impulsion au balancier.

L'échappement à cylindre, que nous venons de décrire, est pour le balancier ce que l'échappement à ancre est pour le pendule. Dans ces deux échappements, tant qu'une dent est arrêtée, soit par le cylindre, soit par l'ancre, elle reste complétement immobile. De même, dans l'un comme dans l'autre, le régulateur est constamment sous l'influence du moteur, influence très-faible, il est vrai, mais qui n'en existe pas moins, puisque les dents frottent sur la pièce qui les arrête, et qu'ensuite, au moment où elles se mettent en mouvement, elles donnent une impulsion à cette pièce. L'échappement à cylindre est excellent, et suffit bien pour les montres ordinaires ; mais pour la construction des montres marines, qui doivent marcher pendant plusieurs mois sans se déranger sensiblement, on a imaginé un autre échappement, dans lequel on a fait disparaître cette influence continuelle du moteur sur le régulateur, et qui pour cela porte le nom d'*échappement libre*. Voici en quoi il consiste :

Un ressort A (fig. 247), dont l'épaisseur diminue progressive-

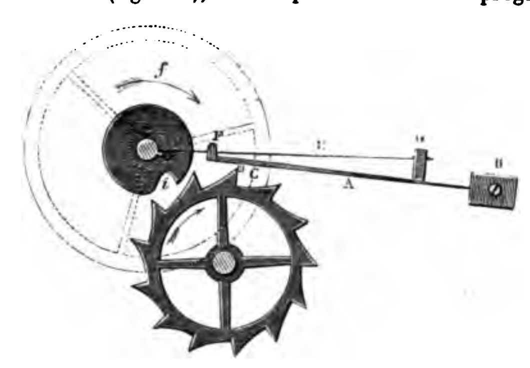


Fig. 247.

ment d'un bout à l'autre, est fixé, par son extrémité amincie, dans un talon B. Ce ressort porte une saillie C, contre laquelle viennent buter successivement les diverses dents de la roue d'échappement. Il porte en outre un petit talon D, dans lequel

est fixé un second ressort très-flexible E. Ce second ressort passe sous l'extrémité recourbée d'un crochet F, qui termine le premier ressort ; en sorte qu'il peut s'abaisser au-dessous de ce crochet sans que rien s'y oppose : tandis que, s'il s'élève, il entraîne le crochet avec lui, et soulève ainsi le ressort A. L'axe G du balancier est muni d'un doigt *a*, qui oscille en même temps que lui, et qui rencontre l'extrémité du petit ressort E à chaque oscillation. Lorsque le mouvement a lieu dans le sens indiqué par la flèche *f*, le doigt abaisse le petit ressort en passant ; mais le ressort A reste immobile, ainsi que la roue d'échappement. Dans l'oscillation contraire, le doigt *a* soulève le ressort E ; celui-ci soulève à son tour le ressort A, la dent qu'arrêtait la saillie C passe, et cette saillie, ramenée aussitôt dans sa position par le ressort A, arrête la dent suivante. Au moment où une dent échappe, une autre dent de la même roue d'échappement vient donner une impulsion au bord *i* d'une entaille pratiquée dans un petit disque fixé à l'axe du balancier ; de cette manière le moteur restitue au balancier, par une action presque instantanée, le mouvement qu'il a pu perdre pendant qu'il a effectué deux oscillations. Sauf le moment où cette impulsion est donnée au balancier, on voit qu'il oscille sans être soumis en aucune façon à l'influence de la force du moteur.

§ 175. Nous avons vu que, dans les horloges dont le régulateur est un pendule, il suffit d'élever ou d'abaisser la lentille du pendule, d'une quantité convenable, à l'aide de l'écrou qui la soutient, pour que l'horloge ne marche ni trop vite ni trop lentement. On a besoin également de pouvoir agir sur le régulateur d'une montre, de manière à atteindre le même but. La durée des oscillations d'un pendule dépend à la fois de l'intensité de la pesanteur qui le fait mouvoir, et de la forme du pendule lui-même ; ne pouvant faire varier la pesanteur, pour modifier la durée des oscillations, on est obligé de changer la forme du pendule, et c'est ce qu'on fait en déplaçant sa lentille. De même la durée des oscillations d'un balancier dépend à la fois de sa forme, et de la force du spiral qui le fait mouvoir; mais, contrairement à ce qu'on fait pour le pendule, c'est en modifiant la force du spiral, et non en changeant la forme du balancier, qu'on fait varier cette durée. Pour y parvenir, on dispose dans le voisinage de l'extrémité fixe du spiral une pièce A (fig. 248), qui présente une échancrure B. Le spiral passe dans cette échancrure, et, lorsqu'il oscille, il ne commence à se déformer qu'à partir du point B; en sorte que la portion BC du spiral est comme si elle n'existait pas, et les choses se passent comme si le spiral

se terminait en B. Cette pièce A peut se mouvoir circulairement autour de l'axe du balancier ; on la déplace en faisant tourner l'aiguille D sur le cadran qui l'accompagne. Quand on fait marcher cette aiguille dans un sens ou dans l'autre, on produit le même effet que si l'on augmentait ou si l'on diminuait la longueur du spiral, et, par suite, on fait varier sa force ; on peut donc amener par là le balancier à faire des oscillations d'une durée déterminée, ou, en d'autres termes, avancer ou retarder la montre, de manière à la régler.



Fig. 248.

Les variations de température déterminant des dilatations ou des contractions dans les diverses parties d'un pendule ou d'un balancier, il en résulte des changements de forme qui font varier la durée des oscillations, et qui, par conséquent, dérangent la marche de l'horloge ou de la montre. On obvie à cet inconvénient en construisant le pendule ou le balancier de matières inégalement dilatables, tellement disposées, que leurs dilatations se contrarient, et qu'il n'en résulte aucun changement dans la durée des oscillations. On obtient ainsi des pendules et balanciers *compensateurs* : nous n'entrerons pas dans le détail de leur construction.

§ 176. Toutes les fois qu'une horloge fixe doit être installée dans un lieu où l'on ne manque pas de place dans le sens vertical, on emploie un poids comme moteur de cette horloge. Le régulateur est d'ailleurs toujours un pendule.

Si l'horloge fixe ne doit occuper que très-peu de place, comme les pendules de cheminée, il est impossible de se servir d'un poids comme moteur ; ou bien il faudrait remonter très-souvent ce poids, en raison du peu d'espace qu'il aurait à parcourir en agissant sur les rouages. Dans ce cas on emploie un ressort, sans lui adjoindre une fusée, en raison de la bonté du régulateur, qui est toujours un pendule. Les variations de la force du ressort n'influent pas d'une manière notable sur la durée des oscillations de ce régulateur.

Le ressort moteur, et le balancier régulateur muni d'un spiral, sont exclusivement employés dans les montres ; elles ne dif-

fèrent entre elles que par l'échappement. Dans les anciennes montres, on employait l'échappement à recul ou à palettes, tel qu'on le voit dans la figure 237, page 249. Avec cet échappement, il fallait nécessairement se servir d'une fusée, pour rendre uniforme l'action du ressort moteur, malgré les variations de sa force. Dans les montres modernes, on a substitué l'échappement à cylindre à l'échappement à recul, et l'emploi de cet échappement a permis de se passer de fusée. En outre on a pu diminuer beaucoup l'épaisseur de la montre, en raison de la suppression de la fusée et de la roue de rencontre. Dans les montres auxquelles on veut donner toute la précision possible, on emploie l'échappement libre, et l'on conserve la fusée, afin d'éviter, autant qu'on le peut, toute cause de variation dans la durée des oscillations.

§ 177. Lorsqu'on remonte le poids moteur d'une horloge, les aiguilles ne rétrogradent pas ainsi que nous l'avons expliqué précédemment, page 257. Mais, pendant toute la durée du remontage, elles restent stationnaires, et elles ne recommencent à marcher que lorsque le remontage est terminé. Il en résulte que, si l'horloge était primitivement à l'heure, elle se trouve ensuite en retard de tout le temps pendant lequel les aiguilles n'ont pas marché. Lorsque l'horloge doit marquer le temps d'une manière très-précise, comme celles qui servent aux observations astronomiques, il est très-important d'éviter ce retard. On y parvient à l'aide de dispositions qui permettent à l'horloge de continuer sa marche, même pendant qu'on la remonte. Nous allons en indiquer une des plus simples, qui est très-employée.

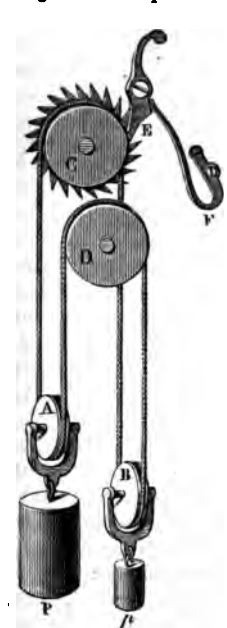


Fig. 249.

Deux poulies mobiles A et B (fig. 249), sont soutenues par une corde sans fin, qui passe dans les gorges de deux poulies fixes C et D. Deux poids P, *p*, sont accrochés à ces deux poulies mobiles. Le plus fort des deux, P, tend à entraîner la corde ; et comme les gorges des poulies C et D sont disposées de manière que les cordons qui les embrassent ne puissent pas y glisser, ces deux pou-

lies fixes tendent à tourner sous l'action du poids P. La poulie C porte latéralement une roue à rochet, dans les dents de laquelle s'engage un doigt E, pressé constamment contre la roue par le ressort F ; et d'après le sens dans lequel les dents du rochet sont tournées, la poulie C ne peut pas céder à l'action du poids P. Quant à la poulie D, elle est fixée à la première des roues dentées qui composent le mécanisme de l'horloge; l'action du poids P fait tourner cette poulie, ce qui détermine le mouvement de tous les rouages. Le poids p est destiné à tendre suffisamment la corde, pour qu'elle ne glisse pas dans les gorges des deux poulies C et D ; ce petit poids monte, en même temps que l'autre descend. Pour remonter l'horloge, il suffit de tirer de haut en bas le cordon qui va de la poulie C à la poulie B ; ce cordon fait tourner la poulie C, sans que le doigt E s'y oppose, et le poids P est remonté, sans cesser d'agir sur le cordon qui va de la poulie D à la poulie A. La poulie D, étant toujours soumise à l'action du poids moteur, même pendant qu'on le remonte, fait tourner les rouages et les aiguilles sans aucune interruption.

Lorsque le moteur d'une horloge ou d'une montre est un ressort agissant directement sur les rouages, sans fusée, les choses peuvent être disposées de manière que les rouages et les aiguilles s'arrêtent pendant le remontage : c'est ce qui a lieu précisément sur la figure 237, ainsi que nous l'avons expliqué dans la page 250. Mais on peut aussi, dans ce cas, par un simple changement de disposition, faire en sorte que les rouages et les aiguilles marchent toujours, pendant qu'on tend le ressort moteur. Il suffit pour cela que ce ressort soit placé dans un barillet fixé à la première des roues du mécanisme, et qu'on le remonte en faisant tourner l'axe auquel est attachée son extrémité intérieure. On voit en effet que, soit qu'on ne touche pas à cet axe intérieur, soit qu'on le fasse tourner pour enrouler le ressort tout autour de lui, l'extrémité extérieure du ressort agira toujours sur la circonférence du barillet, et fera conséquemment tourner sans interruption la roue qui y est fixée, ainsi que toutes les autres. C'est ainsi qu'est disposé le ressort moteur des pendules de cheminée, et aussi celui des montres plates, dans lesquelles l'échappement à cylindre a permis de supprimer la fusée. Il est clair que l'axe, auquel le ressort est attaché intérieurement, doit porter une roue à rochet, qui ne le laisse tourner que dans le sens convenable au remontage.

Lorsque le ressort moteur agit par l'intermédiaire d'une fusée, le remontage s'effectue en faisant tourner la fusée en sens contraire du sens *dans lequel le ressort* la fait habituellement

tourner [illegible] manière [illegible] que l'action du ressort avait [illegible] sur le [illegible] barillet, s'enroule de nouveau [illegible] barillet [illegible] sous l'action de la [illegible] extérieure du ressort, [illegible] autour de son axe. Pour que le [illegible] pendant le remontage, [illegible] rouages, on lui a adapté une roue à rochet, [illegible] sur la première [illegible] sur la figure 250. [illegible] dans l'intérieur de la roue dentée, et un doigt, qui s'y trouve placé, vient s'engager entre ses dents. La fusée et la roue dentée ont été écartées l'une de l'autre dans la figure 250, afin de bien montrer cette disposition.

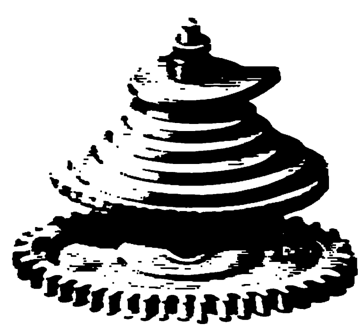
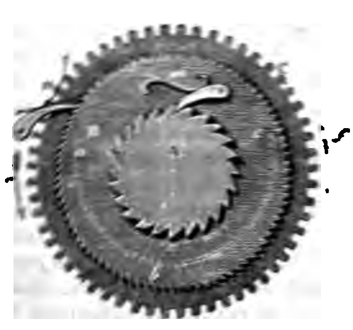



Fig. 250.

Voici maintenant comment on parvient à faire continuer le mouvement de la montre, pendant qu'on la remonte, en enroulant la chaîne sur la fusée. La roue à rochet A, qui fait corps avec la fusée (fig. 251), au lieu d'agir directement sur la première roue du rouage, n'agit sur cette roue que par l'intermédiaire d'une seconde roue à rochet B, dont les dents sont tournées en sens contraire. Lorsque le ressort moteur tend la chaîne et fait tourner la fusée, la roue à rochet A, qui en dépend, tourne dans le sens de la flèche *f* : à l'aide du doigt *m*, cette roue fait tourner, dans le même sens, la roue B dont les dents passent ainsi successivement sous le doigt *n*, sans être nullement gênées par ce doigt. Un ressort *abc* est fixé, d'une part en *a* à la roue B, et d'une autre part en *c* à la roue C. La roue B, mise en


Fig. 251.

mouvement comme nous venons de le dire, tire l'extrémité *a* de ce ressort; il se tend, et tire à son tour la roue C, pour la faire tourner dans le même sens. Lorsqu'on fait tourner la fusée, et par suite la roue A, dans le sens de la flèche *f'*, pour remonter la montre, la roue B ne peut pas la suivre, à cause du doigt *n* qui l'en empêche ; l'extrémité *a* du ressort *abc* ne pouvant rétrograder, la tension de ce ressort continue à tirer le point *c* de la roue C, dans le sens de la flèche *f*, et la montre ne cesse pas de marcher. Ce ressort peut ainsi entretenir seul le mouvement des rouages et des aiguilles, pendant un temps assez long, pour qu'on puisse remonter complétement la montre ; lorsque ensuite le ressort moteur reprend son action, il restitue au ressort *abc* la tension qu'il a perdue pendant le remontage.

§ 178. Pour terminer ce que nous avons à dire de l'horlogerie, nous indiquerons la disposition d'une sonnerie, c'est-à-dire du mécanisme spécial qui fait sonner les heures et les fractions d'heure, à mesure qu'elles sont marquées sur le cadran par les aiguilles. La figure 252 représente la sonnerie d'une horloge fixe dont le moteur est un poids. Cette sonnerie a un moteur spécial, qui est également un poids, attaché à l'extrémité de la corde A. Cette corde s'enroule sur un cylindre B ; le mouvement que le poids moteur tend à lui imprimer se transmet à la roue C montée sur le même arbre ; la roue C engrène avec le pignon D, et fait ainsi tourner une seconde roue E ; la roue E, agissant sur le pignon F, fait tourner une troisième roue G ; celle-ci transmet son mouvement au pignon H, et, par suite, à une quatrième roue I; la roue I le transmet à son tour au pignon K et à une cinquième roue L ; enfin la roue L fait tourner le pignon M, dont l'axe porte deux palettes N, N, destinées à choquer l'air, pour régulariser le mouvement. Pendant que tous ces rouages tournent sous l'action du poids moteur, des chevilles *a*, *a*, fixées sur l'un des côtés de la roue G, viennent successivement soulever le levier *b*; ce levier fait tourner l'axe *c*, auquel est attachée la queue du marteau *e*. Aussitôt qu'une des chevilles *a*, *a*, abandonne le levier *b*, après l'avoir soulevé, ce levier revient dans sa position primitive, en vertu de l'action d'un ressort, et le marteau se trouve ainsi ramené vers le timbre *f*. Si la queue du marteau était rigide, il ne viendrait pas toucher le timbre. Mais au contraire elle est flexible et élastique ; le marteau peut donc dépasser sa position d'équilibre, en vertu de sa vitesse acquise, et venir choquer le timbre, pour être ensuite brusquement ramené en arrière par l'élasticité de sa queue. On voit par là que le marteau frappera un coup sur le timbre, chaque

fois qu'une des chevilles *a*, *a*, viendra soulever le levier *b*.

Tant que l'horloge ne doit pas sonner, une cheville *i*, qui existe seule sur le côté de la roue I, vient buter sur l'extrémité *h* d'un levier *gh*. Ce levier, mobile autour du point *g*, est soulevé par

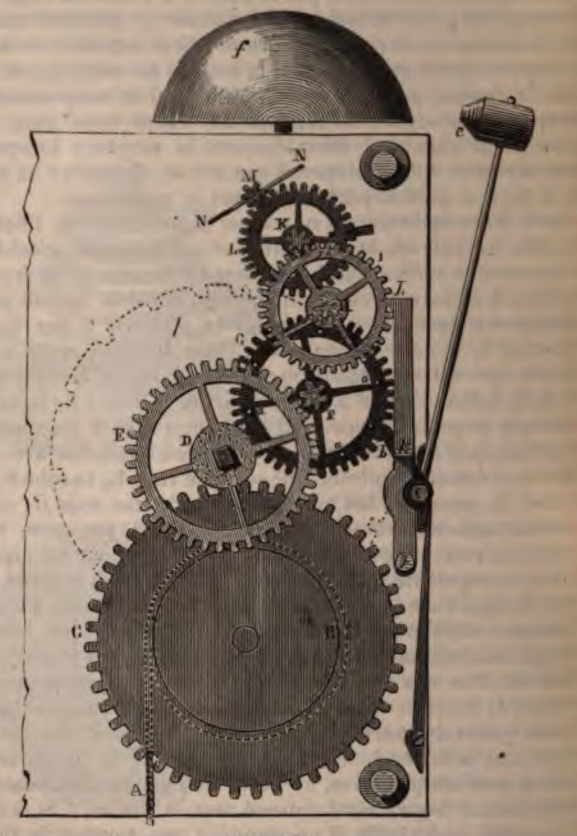


Fig. 252.

un appendice qui dépend du mécanisme de l'horloge, au moment même où la sonnerie doit commencer à marcher. Si le levier *gh* retombe tout de suite dans sa position primitive, la roue I est arrêtée après avoir fait un seul tour ; une seule cheville *a* est

venue agir sur le levier b, et le marteau ne frappe qu'un coup sur le timbre. Pour que le marteau frappe le nombre de coups qui correspond à l'heure marquée par les aiguilles, on a fixé au levier gh un couteau k, qui s'appuie sur le contour d'une roue l placée en arrière. Tout autour de cette roue ont été pratiqués les crans inégalement espacés. Comme elle est fixée à l'axe de la roue E, elle tourne en même temps que la sonnerie marche, mais avec une grande lenteur, et vient ainsi présenter successivement les divers points de son contour au couteau k. Si, au moment où le levier gh retombe, le couteau k entre dans un cran, l'extrémité h du levier arrête la cheville i; mais si le couteau k s'arrête sur une portion de la roue l comprise entre deux crans, le levier gh ne peut pas arrêter la cheville i, et la sonnerie continue à marcher, jusqu'à ce que la roue l, en tournant, vienne présenter un cran au couteau k.

La roue l, qui ne marche que d'une petite quantité, chaque fois que la sonnerie se met en mouvement, doit faire un tour entier dans l'espace de douze heures, qui forme la période de temps au bout de laquelle reviennent des heures de même nom. Pendant ce temps-là, la roue I doit faire autant de tours que le marteau doit frapper de coups : c'est-à-dire 78 tours, si le marteau ne sonne que les heures, et 90 tours si le marteau doit en outre frapper un coup aux demi-heures, comme dans les pendules de cheminée.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LE TRANSPORT DES FARDEAUX.

§ 179. Pour transporter un corps pesant d'un endroit à un autre, sur un sol horizontal, on a toujours besoin d'employer une certaine force, qui varie beaucoup pour un même corps, suivant les circonstances dans lesquelles le transport s'effectue. L'emploi de cette force donne lieu au développement d'une certaine quantité de travail. Mais, si l'on y réfléchit, on reconnaît sans peine que ce n'est pas le transport en lui-même qui nécessite ce travail. On voit, en effet, que si le corps pouvait glisser ou rouler sur le sol, sans éprouver aucune des résistances passives qui se présentent en pareil cas, il suffirait de lui donner une impulsion, aussi légère qu'on voudrait, pour qu'il se mît immédiatement en mouvement; et comme aucune cause ne tendrait à ralentir son mouvement, il conserverait indéfiniment la même vitesse. Lorsque ce corps serait arrivé au lieu où l'on voulait le transporter, on l'y arrêterait. Le transport se serait donc effectué sans qu'on eût à développer d'autre travail moteur que celui

qui correspond à l'impulsion initiale; et encore ce travail moteur, qui peut être extrêmement petit, pourrait-il toujours donner lieu à la production d'une quantité égale de travail utile, au moment où l'on arrêterait le corps.

Les résistances passives qui se développent dans le transport d'un corps pesant sur un sol horizontal, sont donc les seules résistances qu'on ait à vaincre dans ce transport; elles seules nécessitent l'emploi d'une force agissant constamment, ou presque constamment, pour que le corps puisse parcourir une distance un peu grande. On conçoit par là comment il se fait qu'en variant les moyens de transport, on peut réduire à des proportions si minimes la force de traction qui entretient le mouvement de fardeaux énormes. Nous allons passer en revue les divers modes de transport des fardeaux, en les étudiant surtout sous le point de vue des résistances que chacun d'eux occasionne.

§ 180. **Transport direct par l'homme ou les animaux.** — Lorsqu'un homme porte un fardeau, soit dans ses mains, soit sur son dos, soit de toute autre manière, les résistances passives qui se développent se réduisent simplement à la résistance que ce fardeau éprouve de la part de l'air; et comme la vitesse n'est jamais bien grande, cette résistance est, la plupart du temps, négligeable. La force de traction exercée par l'homme, c'est-à-dire la force qu'il applique au fardeau, horizontalement et dans le sens du mouvement, est donc, pour ainsi dire, nulle. Mais l'opération du transport est accompagnée d'une tension des muscles qui servent à soutenir le fardeau, tension qui fatigue l'homme, et qui le fatiguerait également, quand même il resterait au repos; en outre les muscles des jambes, qui servent à la locomotion, éprouvent une fatigue, en raison du jeu qu'ils prennent. Ces divers causes réunies font que le transport direct d'un fardeau par un homme est très-pénible; qu'il ne peut s'effectuer que pour des fardeaux dont le poids n'est pas trop grand; et enfin qu'on ne doit y avoir recours que pour de petites distances à parcourir, lorsque le poids des fardeaux est un peu considérable.

Le transport à dos d'animaux donne lieu à des observations du même genre.

§ 181. **Transport par glissement.** — Lorsque le transport d'un corps pesant s'effectue sans qu'il soit porté par un ou plusieurs hommes, ou par un animal, ce corps doit s'appuyer sur le sol, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un appareil qui sert à le transporter. La pression qu'il exerce en ses points d'appui sur le sol donne lieu à des résistances qui s'ajoutent à la résistance de l'air, pour s'opposer à son mouvement. Si le corps

repose directement sur le sol, et qu'on le fasse mouvoir par glissement, il se développe un frottement qui est souvent très-intense. C'est ce qui a lieu, par exemple, lorsqu'on transporte de longues pièces de bois, en les faisant traîner par des chevaux, à l'aide de chaînes que l'on attache à l'une de leurs extrémités. C'est encore ce qui a eu lieu dans le transport de l'obélisque dont nous avons parlé précédemment, lorsqu'on l'a fait glisser en Égypte, avant de l'introduire dans le navire, et à Paris, après l'en avoir extrait (§§ 148 et 149).

Dans de pareils mouvements, la résistance à vaincre varie suivant la nature des surfaces qui glissent l'une sur l'autre. Pour diminuer la résistance, on fait en sorte que ces surfaces soient formées de matières qui glissent facilement; on les polit, et on les enduit quelquefois de matières grasses, qui diminuent la grandeur du frottement pour une même pression. Nous en avons vu un exemple dans le transport de l'obélisque; on l'a fait glisser sur un sol recouvert de madriers qu'on entretenait constamment graissés. Les traîneaux qu'on emploie pour transporter des pièces de vin ou de bière, à l'intérieur des villes (fig. 253), sont garnis



Fig. 253.

en dessous de bandes de fer qui leur permettent de glisser plus facilement sur le pavé. Les patins, dont on se sert pour patiner sur la glace, ne sont autre chose que des lames de fer que l'on attache sous ses pieds, de manière à rendre presque nulle la résistance qui se développe pendant qu'on glisse.

§ 182. **Transport par roulement.** — Lorsqu'un corps est susceptible, par sa forme, de rouler facilement sur le sol, on en profite pour le transporter; la résistance qu'on a à vaincre dans ce cas est généralement beaucoup plus faible que celle qu'on éprouverait en le faisant glisser. Vitruve rapporte que ce moyen fut employé par *Ctésiphon, architecte* du fameux temple de

[illegible], pour transporter des fûts de colonne qui pesaient [illegible] kilogrammes : à cet effet il leur adapta une monture [illegible] à leur appliquer une force de traction, comme on le fait pour les rouleaux dont on se sert en agriculture. C'est de la même manière qu'un homme transporte facilement une pierre [illegible] à une petite distance, en la poussant pour la faire rouler devant lui.

[illegible] d'un fardeau se prête à ce mode de transport [illegible] d'une autre manière à remplacer le glissement par un roulement. Si le fardeau présente une face plane [illegible] un peu grande, on le fait reposer par cette face sur deux rouleaux de bois (fig. 234), placés sur le sol, à une certaine distance l'un de l'autre, et dans des directions perpendiculaires à celle du mouvement qu'on veut produire. Lorsque ensuite on tire ou qu'on pousse ce fardeau, il marche, en faisant rouler les rouleaux ; et, si le sol n'est pas trop irrégulier, le déplacement s'effectue sans qu'il y ait glissement, ni des rouleaux sur le sol ni du fardeau sur les rouleaux. Il résulte de ce qui a été dit à la fin du § 128, que la force nécessaire pour faire mouvoir ainsi un fardeau sera d'autant plus grande que le diamètre des rouleaux sera plus petit ; et qu'en conséquence, il est avantageux de prendre des rouleaux d'un aussi grand diamètre qu'on pourra.



Fig. 234.

Le mode de transport dont nous venons de parler présente un grave inconvénient, qui fait qu'on n'y a recours que lorsque la distance à parcourir est petite. Il consiste en ce que les rouleaux ne marchent pas aussi vite que le fardeau. Si l'on examine ce qui se passe pendant le mouvement, on verra que chaque rouleau roule bien sur le sol, dans le sens même du déplacement que prend le fardeau ; mais il ne touche pas ce fardeau toujours aux mêmes points ; il roule sous sa face inférieure, en sens contraire, de manière à la toucher successivement en des points de plus en plus éloignés de la portion du fardeau qui est en avant. On voit aisément que, pendant que le rouleau fait un tour entier en roulant sur le sol, c'est-à-dire pendant qu'il s'avance d'une quantité égale à la longueur de sa circonférence, le fardeau marche d'une

quantité égale à deux fois cette longueur ; la vitesse avec laquelle le rouleau se déplace sur le sol n'est que la moitié de celle du fardeau. Il en résulte qu'après un déplacement de peu d'étendue, l'un des deux rouleaux est tellement resté en arrière, qu'il ne supporte plus rien. On est donc obligé de le reporter sous la partie antérieure du fardeau ; ou plutôt, pour éviter le mouvement de bascule qui se produit au moment où le corps commence à ne plus s'appuyer que sur un rouleau, on a soin de disposer en avant un troisième rouleau, qui se trouve engagé sous le fardeau avant que le rouleau qui est en arrière cesse d'agir.

§ 183. **Transport sur des roues.** — Pour faire disparaître l'inconvénient que nous venons de signaler dans le transport à l'aide de rouleaux, il n'y a qu'à les remplacer par des pièces qui, tout en roulant sur le sol, restent toujours attachées au fardeau, et le suivent dans son mouvement. C'est ce qu'on fait en employant des roues ; et, pour ne pas être obligé de fixer les axes de ces roues aux divers fardeaux qu'on peut avoir à transporter, on se sert de brancards, auxquels les roues sont adaptées, et sur lesquels les fardeaux doivent être placés. Telle est l'origine des voitures de diverses formes, qui servent, comme on le voit tous les jours, à transporter des voyageurs, des marchandises, des matériaux de construction, et en un mot toutes sortes de fardeaux.

Dans le transport sur des roues, il y a à la fois roulement de la roue sur le sol, et glissement de l'essieu dans la boîte de la roue : le frottement n'est donc pas complétement évité, comme dans l'emploi des rouleaux. Mais l'influence de ce frottement est d'autant plus faible que le rapport du diamètre de la roue au diamètre de sa boîte est plus grand ; car plus ce rapport sera considérable, moins le déplacement du point d'application de la force de frottement sera grand, pour un même chemin parcouru par la voiture, et par conséquent plus le travail résistant occasionné par cette force de frottement sera petit. La grandeur du diamètre de la roue présente encore un autre avantage, c'est que plus ce diamètre est grand, plus doit être petite la force appliquée au brancard, et par suite, à son centre, pour vaincre la résistance au roulement (fin du § 128).

Le transport sur une brouette, telle que celle qui est figurée à la page 24, tient à la fois du transport direct dont nous avons parlé au § 180, et du transport sur des roues. En effet, le poids de la brouette, et du fardeau qu'elle contient, se décompose en deux parties dont l'une est supportée par la roue, et l'autre par les mains de l'homme qui tient les manches ; cet homme a donc, à la fois, à supporter la dernière portion de ce poids, et à pousse

la brouette horizontalement, pour vaincre les résistances qu'occasionne la première portion.

Lorsqu'on se sert d'une voiture, munie de deux roues qui tournent autour des extrémités d'un même essieu, le poids du brancard, avec tout ce qu'il porte, se décompose également en deux parties, dont l'une est supportée par les deux roues, et l'autre par l'homme ou l'animal qui doit agir sur les limons. Mais il y a une différence essentielle avec la brouette : c'est qu'on dispose habituellement la charge que doit porter la voiture de manière que son centre de gravité soit à peu près sur le plan vertical qui passe par l'axe de l'essieu. L'homme ou l'animal qui doit exercer horizontalement une force de traction pour faire marcher la voiture n'a de cette manière qu'à agir faiblement sur les limons, dans le sens vertical, pour maintenir le brancard dans une position convenable.

Quand on emploie une voiture à quatre roues, le brancard et la charge ont toujours leur centre de gravité tellement placé, que la verticale qui le renferme passe à l'intérieur du quadrilatère formé par les points d'appui des quatre roues avec le sol. Aussi n'a-t-on plus besoin d'exercer aucune action dans le sens vertical, pour maintenir le brancard horizontal : il suffit de tirer la voiture, dans le sens du mouvement qu'on veut produire, pour vaincre les résistances occasionnées par le roulement des roues sur le sol, par le glissement des essieux dans les boîtes des roues, et par l'air que la voiture vient rencontrer dans son mouvement.



Fig. 255.

§ 184. **Stabilité des voitures.** — D'après ce que nous avons dit, on doit donner d'assez grandes dimensions aux roues d'une voiture, pour atténuer autant que possible l'effet des résistances au roulement et au glissement. Il s'ensuit que la charge de la voiture se trouve habituellement élevée d'une quantité assez considérable au-dessus du sol. Cette disposition ôte de la stabilité à la voiture; c'est-à-dire qu'elle est plus exposée à se renverser sur le côté, par suite des inégalités que présente le chemin qu'elle parcourt. Pour que la voiture ne *verse* pas, il faut que la verticale, passant

par son centre de gravité G (fig. 255), rencontre toujours le sol entre les points par lesquels les roues le touchent. Or on voit que, plus ce centre de gravité sera élevé, moins la voiture devra être penchée sur le côté, pour que la verticale qui le contient sorte des limites qui viennent de lui être assignées.

Lorsqu'une voiture est en mouvement sur un chemin incliné transversalement, et qu'en conséquence elle penche vers le côté le plus bas du chemin, la vitesse qu'elle possède influe beaucoup sur sa stabilité. Pendant qu'elle marche, elle penche ordinairement d'une manière irrégulière, tantôt plus, tantôt moins, suivant qu'elle se trouve dans telle ou telle partie du chemin. Pour analyser ce qui se passe en pareil cas, nous pouvons regarder la voiture comme animée de deux mouvements bien distincts : le premier est son mouvement de translation dans le sens de la longueur du chemin ; le second est un mouvement de rotation autour de la tangente horizontale menée au point A de la roue la plus basse. En vertu de ce second mouvement, le centre de gravité G décrit un arc de cercle ayant son centre sur la tangente dont on vient de parler ; tantôt il monte, tantôt il descend sur cet arc de cercle. Pour que la voiture ne verse pas, il faut que le point G ne dépasse jamais le point le plus élevé B du cercle ; autrement la pesanteur, en agissant sans cesse sur elle, continuerait à la faire tourner autour de la tangente à la roue au point A, et la ferait ainsi tomber sur le côté. Au moment où la roue de gauche rencontre une aspérité du chemin qui la force à s'élever, le centre de gravité monte sur l'arc de cercle qu'il est obligé de décrire. Si la voiture va lentement, la pesanteur maintiendra la roue de gauche en contact avec le sol, tant que le centre de gravité n'aura pas dépassé le point B. Mais si la voiture va vite, les aspérités que la roue de gauche rencontrera la forceront à s'élever rapidement ; le centre de gravité se trouvera, pour ainsi dire, lancé de bas en haut sur son arc de cercle ; en vertu de la vitesse de rotation que la voiture recevra ainsi, la roue de gauche s'élèvera de manière à ne plus toucher le sol : et il pourra arriver que le centre de gravité monte ainsi jusqu'au point B, la pesanteur n'ayant pas eu le temps de détruire son mouvement ascendant avant qu'il atteigne ce point. On conçoit par là comment il se fait qu'une voiture verse, quand elle marche rapidement sur un chemin, dont la pente transversale ne l'aurait pas fait verser, si sa vitesse eût été moins grande.

Les voitures suspendues sont plus susceptibles de verser que celles qui ne le sont pas, ainsi que nous allons le faire comprendre facilement. Les ressorts de suspension sont destinés à

atténuer les secousses que la voiture reçoit à cause des inégalités du chemin. Ces secousses sont éprouvées d'abord par les roues et l'ensemble des pièces qui sont fixées aux essieux; elles se transmettent ensuite au reste de la voiture, par l'intermédiaire des ressorts, qui en amoindrissent l'effet en fléchissant plus ou moins. Lorsque le chemin présente des inégalités qui font pencher la voiture de côté et d'autre, et d'une quantité plus ou moins grande, le corps de la voiture ne s'incline pas de même que s'il était fixé aux roues sans l'interposition des ressorts. Si une roue est brusquement soulevée par une aspérité, le corps de la voiture ne cède pas tout de suite à ce mouvement; les ressorts fléchissent, et il en résulte que la roue qui a été soulevée n'a fait, pour ainsi dire, que se rapprocher du corps de la voiture. Bientôt les ressorts, qui ont été tendus plus qu'à l'ordinaire, réagissent et font prendre à la voiture l'inclinaison qu'elle aurait prise tout de suite sans leur présence. Mais la voiture ne s'arrête pas, dans ce mouvement, au moment où ses ressorts ont repris leur forme habituelle; elle se trouve animée d'une vitesse qui la fait incliner davantage, en forçant les ressorts à fléchir en sens contraire. Il en résulte que la voiture penche en définitive plus fortement que si elle n'eût pas été suspendue; et elle pourra verser dans des lieux où elle n'aurait pas versé, si elle n'avait pas été munie de ressorts.

Il est aisé de conclure de ce qui précède, que les diligences employées sur les routes, pour le transport des voyageurs, présentent une très-mauvaise disposition, sous le rapport de la stabilité. L'accumulation des bagages, à leur partie supérieure, fait que le centre de gravité de toute la voiture, lorsqu'elle est chargée, se trouve très-élevé au-dessus du sol, et les balancements que les inégalités de la route lui transmettent par l'intermédiaire des ressorts, n'ont pas besoin d'être bien grands pour qu'elle verse.

§ 185. **Tirage des voitures.** — La grandeur du tirage, c'est-à-dire de la force de traction qui doit être appliquée à une voiture, pour vaincre les résistances passives qui tendent à ralentir son mouvement, change beaucoup avec les circonstances dans lesquelles ce mouvement a lieu. Des expériences ont été faites pour déterminer la valeur de cette force, et les lois des variations qu'elle éprouve dans les divers cas. Nous allons indiquer les principaux résultats auxquels on est parvenu.

En faisant varier seulement la charge de la voiture, et la faisant marcher toujours sur le même chemin, on a trouvé que le tirage était sensiblement proportionnel à la pression des roues sur le chemin, c'est-à-dire au poids de la charge augmenté du

poids de la voiture elle-même. C'est ce qui devait avoir lieu, puisque les résistances au glissement et au roulement sont proportionnelles à la pression (§§ 127 et 128), et que la force de traction est presque exclusivement employée à vaincre ces résistances.

Pour une même nature de chemin, et pour une même charge, le tirage varie en raison inverse du diamètre des roues. On devait s'y attendre, d'après ce qui a été dit au § 183.

Toutes les fois que le roulement des roues sur le chemin est accompagné de chocs, comme cela a lieu sur le pavé, le tirage augmente avec la vitesse. Dans les autres cas, le tirage reste le même, quelle que soit la vitesse. Ce résultat était facile à prévoir, d'après ce que nous avons dit sur la perte de travail occasionnée par les chocs (§ 144).

Quant à la manière dont le tirage varie avec la nature du chemin, on en aura une idée en examinant le tableau suivant, qui donne le rapport du tirage au poids total de la voiture, dans les circonstances qui se présentent le plus habituellement, et avec les roues qui sont généralement adoptées.

NATURE DU CHEMIN.	RAPPORT du tirage à la charge totale.
Terrain naturel, non battu, argileux, sec.	0,250
Terrain naturel, non battu, siliceux et crayeux	0,165
Terrain ferme, battu et très-uni	0,040
Chaussée en sable ou cailloutis nouvellement placés	0,125
Chaussée en empierrement à l'état d'entretien ordinaire	0,080
Chaussée en empierrement parfaitement entretenue et roulante	0,033
Chaussée pavée, voiture suspendue... au pas	0,030
Chaussée pavée, voiture suspendue... au grand trot	0,070
Tablier de pont en madriers de chêne non rabotés	0,022
Chemins à ornières plates de fonte ou de dalles très-dures	0,010
Chemins de fer à ornières saillantes en bon état	0,007
Chemins de fer, id., les essieux étant continuellement graissés	0,005

Ce tableau met en évidence le grand avantage que présentent, sous le rapport du tirage, les chemins de fer à ornières saillantes, c'est-à-dire les chemins de fer tels qu'on les construit partout. Sur de pareils chemins, on peut, avec une même force, traîner une charge beaucoup plus grande que sur les routes ordinaires, quel que soit leur état d'entretien. Nous donnerons un peu plus loin des détails sur leur disposition.

§ 186. **Transport sur un chemin incliné.** — Dans le transport d'un fardeau, seul ou avec une voiture, sur un chemin hori-

au fardeau n'a plus à vaincre que l'excédant de ces résistances. Si l'on observe d'ailleurs que la pression exercée sur le chemin est, comme dans le cas précédent, plus faible que si le chemin était horizontal, on verra que l'inclinaison agit de deux manières différentes pour diminuer la force de traction : en rendant les résistances passives plus faibles, et en donnant lieu à une composante du poids, qui fait équilibre à une partie de ces résistances. La diminution qu'éprouve dans ce cas la force de traction est d'autant plus grande que le chemin est plus incliné. Si l'inclinaison est assez grande, cette force peut être réduite à zéro : alors la composante du poids dirigée parallèlement au chemin fait seule équilibre aux résistances passives. Si l'inclinaison est encore plus grande, non-seulement on ne devra pas tirer le fardeau pour entretenir son mouvement, mais encore il faudra le retenir en lui appliquant une force dirigée en sens contraire du mouvement, si l'on veut que son mouvement ne s'accélère pas indéfiniment. On voit en effet que, pour une pareille inclinaison, les résistances passives sont mises en équilibre par une portion de la composante du poids, qui agit dans le sens du mouvement, et l'autre portion de cette composante augmenterait sans cesse la vitesse du corps, si l'on ne s'opposait pas à son action. C'est ainsi que, lorsqu'une voiture descend sur un chemin fortement incliné, les chevaux qui sont attelés à la voiture sont obligés de la retenir, pour empêcher son mouvement de s'accélérer outre mesure. Il arrive même souvent, lorsqu'il s'agit d'une voiture pesamment chargée, et tirée par plusieurs chevaux placés les uns devant les autres, qu'on détache les chevaux, à l'exception du limonier, pour les attacher derrière la voiture dans les fortes descentes : ils sont alors en mesure de résister, pour détruire la portion de la composante du poids de la voiture, qui n'est pas mise en équilibre par les résistances passives.

Pour faciliter la retenue des voitures dans les descentes, on leur adapte ordinairement des freins, à l'aide desquels on peut augmenter les résistances passives. Ce sont des plaques de fer, ou des morceaux de bois qu'on dispose en arrière, tout près des jantes des roues, à la hauteur de l'essieu (fig. 257). On serre le frein contre les roues, à l'aide d'une vis placée, soit à l'arrière de la voiture, soit sur le devant; dans ce dernier cas, on transmet l'action de la vis au frein par l'intermédiaire de cordes et de leviers diversement combinés. La pression du frein contre les jantes des roues détermine un frottement, qui s'ajoute aux autres résistances passives. Ce frottement est plus ou moins fort, suivant que le frein est plus ou moins serré, mais il ne peut pas croître au delà

zontal, le poids du fardeau, et de la voiture, s'il y en a une, est une force verticale. Ce poids ne produit donc directement aucun effet, ni pour retarder, ni pour accélérer le mouvement ; il n'agit qu'indirectement, en donnant lieu à des résistances passives qui lui sont proportionnelles, et qui doivent être vaincues par la force de traction. Il n'en est plus de même, lorsque le fardeau est mis en mouvement sur un chemin incliné. Son poids, qui est toujours une force verticale appliquée à son centre de gravité G (fig. 256), peut être décomposé en deux forces GB, GC, dont l'une est parallèle au chemin, et l'autre lui est perpendiculaire. La dernière composante, celle qui est perpendiculaire au chemin, ne tend ni à augmenter, ni à diminuer la vitesse du fardeau ; mais c'est elle qui donne lieu au développement des résistances au glissement et au roulement, et ces résistances lui sont proportionnelles. Quant à la première composante, celle qui est parallèle au chemin, elle agit tout entière, et tend soit à augmenter, soit à diminuer la vitesse, suivant qu'elle est dirigée dans le sens du mouvement ou en sens contraire.

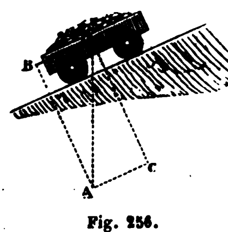


Fig. 256.

Lorsqu'on fait monter le fardeau sur le chemin incliné, la force de traction qu'on lui applique doit être capable de vaincre, à la fois, les résistances passives auxquelles le mouvement donne lieu, et la composante du poids du fardeau qui est dirigée parallèlement au chemin. La pression exercée par le fardeau sur le chemin est moins grande que si le chemin était horizontal, puisque cette pression n'est qu'une composante de son poids : l'inclinaison du chemin détermine donc une diminution dans les résistances passives qui résultent de cette pression. Mais si la force de traction, qui doit être appliquée au fardeau, pour le faire monter, éprouve une diminution sous ce rapport, cette diminution est plus que compensée par l'augmentation qu'elle doit recevoir pour vaincre la composante GB (fig. 256), du poids du fardeau. En définitive, il faut une plus grande force pour faire monter le fardeau sur un chemin incliné, que pour le faire mouvoir sur un chemin horizontal, et cette force sera d'autant plus grande que l'inclinaison du chemin sera plus prononcée.

Lorsqu'un fardeau descend le long du chemin incliné, la composante de son poids, qui est parallèle au chemin, agit dans le sens du mouvement. Cette composante fait donc équilibre à une portion des résistances passives, et la force de traction qu'on doit appliquer

au fardeau n'a plus à vaincre que l'excédant de ces résistances. Si l'on observe d'ailleurs que la pression exercée sur le chemin est, comme dans le cas précédent, plus faible que si le chemin était horizontal, on verra que l'inclinaison agit de deux manières différentes pour diminuer la force de traction : en rendant les résistances passives plus faibles, et en donnant lieu à une composante du poids, qui fait équilibre à une partie de ces résistances. La diminution qu'éprouve dans ce cas la force de traction est d'autant plus grande que le chemin est plus incliné. Si l'inclinaison est assez grande, cette force peut être réduite à zéro : alors la composante du poids dirigée parallèlement au chemin fait seule équilibre aux résistances passives. Si l'inclinaison est encore plus grande, non-seulement on ne devra pas tirer le fardeau pour entretenir son mouvement, mais encore il faudra le retenir en lui appliquant une force dirigée en sens contraire du mouvement, si l'on veut que son mouvement ne s'accélère pas indéfiniment. On voit en effet que, pour une pareille inclinaison, les résistances passives sont mises en équilibre par une portion de la composante du poids, qui agit dans le sens du mouvement, et l'autre portion de cette composante augmenterait sans cesse la vitesse du corps, si l'on ne s'opposait pas à son action. C'est ainsi que, lorsqu'une voiture descend sur un chemin fortement incliné, les chevaux qui sont attelés à la voiture sont obligés de la retenir, pour empêcher son mouvement de s'accélérer outre mesure. Il arrive même souvent, lorsqu'il s'agit d'une voiture pesamment chargée, et tirée par plusieurs chevaux placés les uns devant les autres, qu'on détache les chevaux, à l'exception du limonier, pour les attacher derrière la voiture dans les fortes descentes : ils sont alors en mesure de résister, pour détruire la portion de la composante du poids de la voiture, qui n'est pas mise en équilibre par les résistances passives.

Pour faciliter la retenue des voitures dans les descentes, on leur adapte ordinairement des freins, à l'aide desquels on peut augmenter les résistances passives. Ce sont des plaques de fer, ou des morceaux de bois qu'on dispose en arrière, tout près des jantes des roues, à la hauteur de l'essieu (fig. 257). On serre le frein contre les roues, à l'aide d'une vis placée, soit à l'arrière de la voiture, soit sur le devant; dans ce dernier cas, on transmet l'action de la vis au frein par l'intermédiaire de cordes et de leviers diversement combinés. La pression du frein contre les jantes des roues détermine un frottement, qui s'ajoute aux autres résistances passives. Ce frottement est plus ou moins fort, suivant que le frein est plus ou moins serré, mais il ne peut pas croître

zontal, le poids du fardeau, et de la voiture, s'il y en a une, est une force verticale. Ce poids ne produit donc directement aucun effet, ni pour retarder, ni pour accélérer le mouvement ; il n'agit qu'indirectement, en donnant lieu à des résistances passives qui lui sont proportionnelles, et qui doivent être vaincues par la force de traction. Il n'en est plus de même, lorsque le fardeau est mis en mouvement sur un chemin incliné. Son poids, qui est toujours une force verticale appliquée à son centre de gravité G (fig. 256), peut être décomposé en deux forces GB, GC, dont l'une est parallèle au chemin, et l'autre lui est perpendiculaire. La dernière composante, celle qui est perpendiculaire au chemin, ne tend ni à augmenter, ni à diminuer la vitesse du fardeau ; mais c'est elle qui donne lieu au développement des résistances au glissement et au roulement, et ces résistances lui sont proportionnelles. Quant à la première composante, celle qui est parallèle au chemin, elle agit tout entière, et tend soit à augmenter, soit à diminuer la vitesse, suivant qu'elle est dirigée dans le sens du mouvement ou en sens contraire.

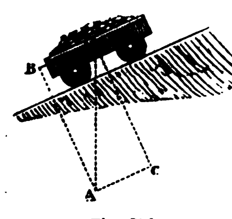


Fig. 256.

Lorsqu'on fait monter le fardeau sur le chemin incliné, la force de traction qu'on lui applique doit être capable de vaincre, à la fois, les résistances passives auxquelles le mouvement donne lieu, et la composante du poids du fardeau qui est dirigée parallèlement au chemin. La pression exercée par le fardeau sur le chemin est moins grande que si le chemin était horizontal, puisque cette pression n'est qu'une composante de son poids : l'inclinaison du chemin détermine donc une diminution dans les résistances passives qui résultent de cette pression. Mais si la force de traction, qui doit être appliquée au fardeau, pour le faire monter, éprouve une diminution sous ce rapport, cette diminution est plus que compensée par l'augmentation qu'elle doit recevoir pour vaincre la composante GB (fig. 256), du poids du fardeau. En définitive, il faut une plus grande force pour faire monter le fardeau sur un chemin incliné, que pour le faire mouvoir sur un chemin horizontal, et cette force sera d'autant plus grande que l'inclinaison du chemin sera plus prononcée.

Lorsqu'un fardeau descend le long du chemin incliné, la composante de son poids, qui est parallèle au chemin, agit dans le sens du mouvement. Cette composante fait donc équilibre à une portion des résistances passives, et la force de traction qu'on doit appliquer

au fardeau n'a plus à vaincre que l'excédant de ces résistances. Si l'on observe d'ailleurs que la pression exercée sur le chemin est, comme dans le cas précédent, plus faible que si le chemin était horizontal, on verra que l'inclinaison agit de deux manières différentes pour diminuer la force de traction : en rendant les résistances passives plus faibles, et en donnant lieu à une composante du poids, qui fait équilibre à une partie de ces résistances. La diminution qu'éprouve dans ce cas la force de traction est d'autant plus grande que le chemin est plus incliné. Si l'inclinaison est assez grande, cette force peut être réduite à zéro : alors la composante du poids dirigée parallèlement au chemin fait seule équilibre aux résistances passives. Si l'inclinaison est encore plus grande, non-seulement on ne devra pas tirer le fardeau pour entretenir son mouvement, mais encore il faudra le retenir en lui appliquant une force dirigée en sens contraire du mouvement, si l'on veut que son mouvement ne s'accélère pas indéfiniment. On voit en effet que, pour une pareille inclinaison, les résistances passives sont mises en équilibre par une portion de la composante du poids, qui agit dans le sens du mouvement, et l'autre portion de cette composante augmenterait sans cesse la vitesse du corps, si l'on ne s'opposait pas à son action. C'est ainsi que, lorsqu'une voiture descend sur un chemin fortement incliné, les chevaux qui sont attelés à la voiture sont obligés de la retenir, pour empêcher son mouvement de s'accélérer outre mesure. Il arrive même souvent, lorsqu'il s'agit d'une voiture pesamment chargée, et tirée par plusieurs chevaux placés les uns devant les autres, qu'on détache les chevaux, à l'exception du limonier, pour les attacher derrière la voiture dans les fortes descentes : ils sont alors en mesure de résister, pour détruire la portion de la composante du poids de la voiture, qui n'est pas mise en équilibre par les résistances passives.

Pour faciliter la retenue des voitures dans les descentes, on leur adapte ordinairement des freins, à l'aide desquels on peut augmenter les résistances passives. Ce sont des plaques de fer, ou des morceaux de bois qu'on dispose en arrière, tout près des jantes des roues, à la hauteur de l'essieu (fig. 257). On serre le frein contre les roues, à l'aide d'une vis placée, soit à l'arrière de la voiture, soit sur le devant; dans ce dernier cas, on transmet l'action de la vis au frein par l'intermédiaire de cordes et de leviers diversement combinés. La pression du frein contre les jantes des roues détermine un frottement, qui s'ajoute aux autres résistances passives. Ce frottement est *plus ou moins* fort, suivant que le frein est *plus ou moins serré*, *mais il ne* peut pas croître au delà

d'une certaine limite. On voit, en effet, que si le frein était trop fortement serré, son adhérence avec les jantes des roues empêcherait celles-ci de tourner, et les roues glisseraient sur le che-

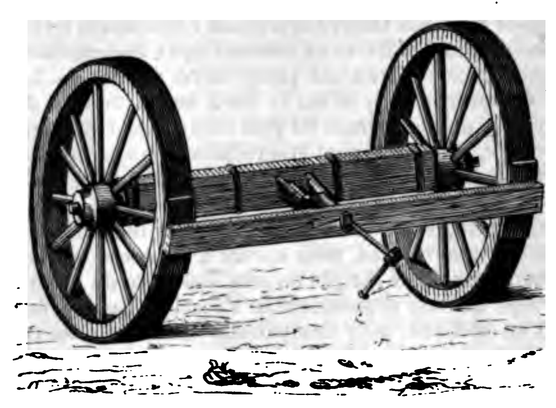


Fig. 257.

min, comme si elles avaient été invariablement fixées à leur essieu. Le frottement additionnel, qui résulte de la pression du frein contre les jantes des roues, ne peut donc pas devenir plus grand que le frottement des roues elles-mêmes sur le chemin, lorsqu'elles ne tournent pas. Aussitôt que la pression du frein est capable de déterminer un frottement plus considérable, les roues s'arrêtent ; ce frottement ne se produit pas, et il est remplacé par le frottement des roues sur le chemin.

Il y a un inconvénient à serrer le frein contre les roues assez fortement pour que celles-ci ne tournent plus ; il consiste en ce que les roues, glissant au lieu de rouler, s'usent d'une manière notable, en un point de leur contour, et par conséquent ce contour peut devenir un peu irrégulier. Pour empêcher cette usure de se produire, dans les cas où l'on peut avoir besoin de remplacer le roulement d'une roue par un glissement, on se sert d'une pièce de fer qu'on nomme un *sabot*, et qu'on place sous la roue, de manière à lui faire supporter toute l'usure qui peut être occasionnée par le glissement. Pour cela il suffit de mettre le sabot en avant de la roue, de telle sorte que celle-ci vienne se poser dessus en roulant. Une chaîne d'une longueur convenable le rattache au brancard de la voiture, et se trouve tendue au moment où la roue s'appuie au milieu de sa face supérieure

(fig. 258). La voiture, continuant à s'avancer, entraîne le sabot qui supporte toujours la roue, et celle-ci ne tourne plus, sans qu'on ait besoin d'employer un frein pour l'empêcher de tourner.



Fig. 258.

§ 187. **Chemins de fer.** — Nous avons vu, par le tableau de la page 277, combien la nature du chemin influe sur le tirage des voitures; c'est pour diminuer ce tirage autant que possible qu'on a construit les chemins de fer, sur lesquels, avec une même force de traction, on peut traîner des fardeaux beaucoup plus lourds que sur les routes ordinaires.

On a d'abord construit des chemins à ornières creuses de fonte, dans lesquelles roulaient des roues amincies vers les bords et présentant la forme de lentilles. Mais ces ornières creuses, dont on avait eu l'idée par les ornières qui se produisent naturellement sur les chemins, n'ont pas tardé à présenter un grave inconvénient : il s'y accumulait des ordures de toutes sortes, qui nuisaient beaucoup à la facilité du roulage, et qui faisaient ainsi disparaître une grande partie des avantages qu'on en attendait. Ces chemins à ornières creuses de fonte existent encore en Angleterre dans des mines, et aussi sur la surface de la terre, dans le voisinage de ces mines; mais on n'en construit plus aucun, à cause de l'inconvénient qui vient d'être signalé.

Les chemins de fer a ornières saillantes sont généralement adoptés maintenant. Les ornières saillantes, ou *rails*, sont de fer forgé : ce sont de fortes barres, amincies vers le milieu de leur largeur, et qu'on pose de champ, au bout les unes des autres. Des traverses de bois sont disposées de distance en distance, dans un sens perpendiculaire à la direction du chemin; chacune de ces traverses porte deux coussinets de fonte, qui sont solidement fixés sur sa surface; les rails sont introduits dans l'ouverture des coussinets, et y sont assujettis à l'aide de coins de bois qu'on y enfonce avec force (fig. 259).

Les roues des voitures ou *wagons*, qui circulent sur ces chemins, ne pourraient se maintenir sur la face supérieure des rails, si leur jante ne présentait un rebord, ou *boudin*, disposé vers l'intérieur de la voie (fig. 260). Les boudins des deux roues qui correspondent à un même essieu, descendent entre les deux rails, un peu au-

dessous de leur face supérieure, et empêchent ainsi les deux roues de sortir de la voie, ou, comme on dit, de dérailler.

Lorsque les roues tendent à s'écarter de la voie, d'un côté ou de

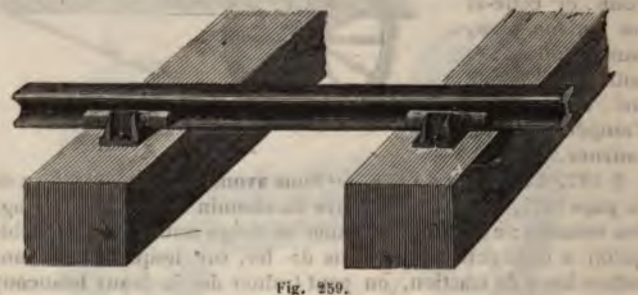


Fig. 259.

l'autre, les boudins s'y opposent, en venant s'appuyer contre la face intérieure de l'un des rails : il en résulte un frottement de ces boudins contre le rail, et cela augmente le tirage. C'est pour éviter ce frottement, qu'on donne aux jantes des roues une forme légèrement conique, comme le montre la figure 260. On incline aussi un

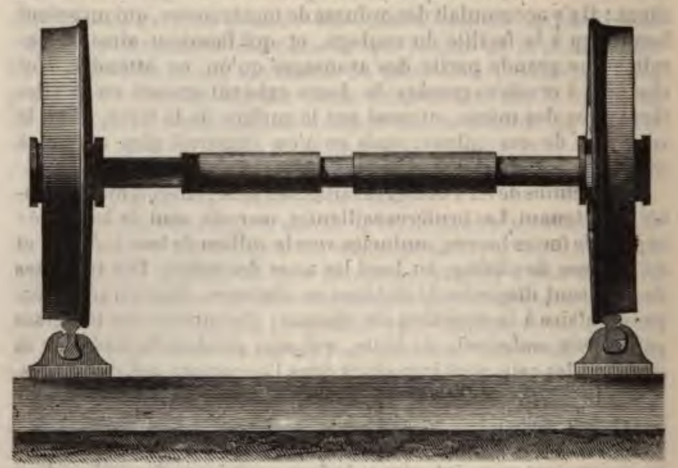


Fig. 260.

peu les rails vers l'intérieur de la voie, et on leur donne un écartement un peu plus grand que la distance qui existe entre les bords

extérieurs des boudins de deux roues correspondantes. De cette manière la pesanteur, en agissant sur les wagons, fait descendre les jantes des roues sur les deux rails, autant que le permet leur écartement, et maintient les deux boudins à une petite distance des faces intérieures des rails. Si, par une cause quelconque, l'un des boudins vient à toucher le rail correspondant, il le quitte bientôt, pour revenir à la position que la pesanteur tend constamment à lui donner.

Pour que les boudins remplissent toujours bien leur objet, et que les wagons aient une stabilité suffisante sur les rails, tout en se mouvant avec une grande rapidité, il est indispensable que les roues se maintiennent bien verticales, c'est-à-dire qu'elles ne penchent ni vers l'intérieur ni vers l'extérieur de la voie. Pour assurer cette stabilité, on ne dispose pas les roues de la même manière que dans les voitures ordinaires. Au lieu de fixer chaque essieu à la voiture, et de faire tourner les roues autour de ses deux extrémités, on fixe les roues à l'essieu, et on le rend mobile avec elles; il tourne dans des coussinets adaptés à la partie inférieure du wagon.

La fixité des roues aux essieux entraine une conséquence que nous devons signaler. D'après cette disposition, les deux roues qui sont adaptées aux deux extrémités d'un même essieu doivent tourner ensemble; elles font nécessairement un même nombre de tours dans un temps donné. Cela ne gêne en rien le mouvement, quand il a lieu sur une voie droite; mais il n'en est pas de même quand la voie est courbe. Dans une voie courbe, le rail extérieur, c'est-à-dire celui qui est placé du côté de la convexité de la voie, est plus long que le rail intérieur; si les deux roues étaient libres de tourner indépendamment l'une de l'autre, celle qui repose sur le rail extérieur, ayant plus de chemin à parcourir que celle qui repose sur le rail intérieur, ferait plus de tours que cette dernière, dans le même temps. Lorsqu'au contraire elles sont fixées à l'essieu, elles sont obligées de s'accorder constamment dans leur mouvement. Si la roue qui repose sur le rail intérieur roule de la même manière que si elle était seule, elle oblige l'autre roue à ne pas tourner autant qu'elle le ferait sans sa liaison avec la première; et il en résulte que cette autre roue doit glisser sur son rail, d'une quantité égale à la différence entre les longueurs des deux rails. Si ce n'est pas la roue extérieure qui glisse, ce sera la roue intérieure; ou bien elles glisseront chacune d'une certaine quantité, l'une dans un sens, l'autre en sens contraire. Quoi qu'il en soit, le roulement de deux roues égales, fixées sur un essieu, ne peut s'effectuer sur une voie

qu'il se produise un glissement; ce glissement détermine un frottement, qui augmente d'autant le tirage. Si l'on veut donc conserver tous les avantages que présente un chemin de fer, sous le rapport de la petitesse du tirage qu'il nécessite, en maintenant les roues fixes aux extrémités de leurs essieux, il faut éviter de donner au chemin des courbures trop prononcées; on devra le former de lignes droites, raccordées par des courbes d'un grand rayon.

Lorsqu'un wagon marche rapidement dans une partie courbe de la voie qu'il parcourt, son mouvement donne lieu au développement d'une force centrifuge très-sensible, dirigée horizontalement, perpendiculairement à la voie, et du côté de la convexité de la courbe. Cette force centrifuge tend à faire sortir le wagon de la voie, et il en résulte que les boudins des roues qui se trouvent du côté de cette convexité viennent frotter contre le rail extérieur. Pour éviter ce frottement, on dispose le rail extérieur un peu plus haut que l'autre dans toute la longueur de la partie courbe; en sorte que, quand un wagon se trouve dans cette partie du chemin, il est comme sur un plan incliné transversalement. La différence de niveau des deux rails a été déterminée de telle manière, que la résultante du poids du wagon, et de la force centrifuge qui se développe lorsqu'il est animé de la vitesse ordinaire, soit dirigée perpendiculairement au plan qui passe sur les faces supérieures des deux rails. Par cette disposition, les deux boudins sont maintenus chacun à une certaine distance du rail dont il est voisin, tout aussi bien que lorsque le wagon marche sur une voie droite, et que les deux rails sont placés au même niveau.

Nous verrons bientôt que l'emploi des machines à vapeur locomotives, pour faire mouvoir les convois de wagons sur les chemins de fer, exige que ces chemins ne présentent pas de trop fortes pentes. D'ailleurs, les pentes un peu fortes feraient disparaître les grands avantages qu'on trouve dans l'emploi des chemins de fer. Aussi les construit-on horizontalement, ou presque horizontalement, et ce n'est que dans des circonstances exceptionnelles qu'on y introduit des pentes prononcées. Il résulte de là que l'on est obligé de faire des déblais et des remblais, suivant que la surface du sol s'élève au-dessus du niveau qu'on veut donner à la voie, ou s'abaisse au-dessous de ce niveau : et lorsque ces différences de niveau sont trop fortes, on construit des *tunnels* et des *viaducs*.

§ 188. Il serait d'une très-grande importance qu'on pût introduire des courbes de petit rayon dans le tracé des chemins de : cela permettrait de se détourner, pour éviter de traverser montagnes ou des vallées, et pour se maintenir toujours à

peu de distance de la surface du sol : de cette manière, les travaux de construction du chemin seraient beaucoup simplifiés, et il en résulterait une grande économie. Divers moyens ont été proposés pour atteindre ce but ; nous n'en indiquerons qu'un seul, celui qui a été imaginé par M. Arnoux, et qui a reçu son application sur le chemin de fer de Paris à Sceaux.

Nous avons vu que c'était surtout la fixité des roues aux essieux qui faisait exclure les courbes de petit rayon, à cause du frottement qui se développe nécessairement dans le parcours de pareilles courbes, en raison de la différence de longueur des deux rails. M. Arnoux a d'abord rendu aux roues leur mobilité autour des extrémités des essieux ; en sorte que les roues d'un même essieu tournent indépendamment l'une de l'autre, et chacune d'elles peut tourner de la quantié convenable, d'après la longueur du chemin qu'elle parcourt, pour ne pas glisser sur le rail.

Mais cela ne suffit pas. Pour que le roulement des roues s'effectue convenablement, et que leurs boudins ne frottent pas contre les bords des rails, il faut que le plan de chaque roue passe, à chaque instant, par la tangente au rail menée au point où cette roue le touche. Il faut donc que l'essieu de cette roue soit dirigé perpendiculairement au rail, c'est-à-dire à la voie. Il en résulte que les deux essieux d'un même wagon ne doivent pas rester parallèles, lorsque le wagon s'engage dans une partie courbe du chemin : ils doivent être dirigés suivant deux rayons du cercle dont cette courbe est une portion, et par conséquent, ils doivent converger vers le centre de ce cercle. En conséquence M. Arnoux a rendu tous les essieux mobiles autour de chevilles ouvrières, comme le sont les essieux de devant des voitures à quatre roues, et il a adopté les dispositions suivantes, pour que chaque essieu, tournant autour de sa cheville ouvrière, se place toujours perpendiculairement à la direction de la voie.

Le premier essieu AA d'un convoi (fig. 261), qu'il appartienne à une locomotive ou à un wagon, peu importe, est dirigé par de petites roues ou galets B, B, au nombre de quatre, dont les axes sont portés par des chapes fixées à l'essieu lui-même. Ces galets s'appuient sur le côté intérieur de chacun des deux rails, et les boudins dont ils sont garnis s'engagent sous les rebords de ces rails, comme le montre la figure 262. D'après cette disposition, dans quelque sens que la voie tourne, les galets B, B, amènent toujours l'essieu AA à être perpendiculaire à sa direction. Le dernier essieu du convoi est dirigé exactement de la même manière.

Voici maintenant en quoi consiste le moyen qui est employé

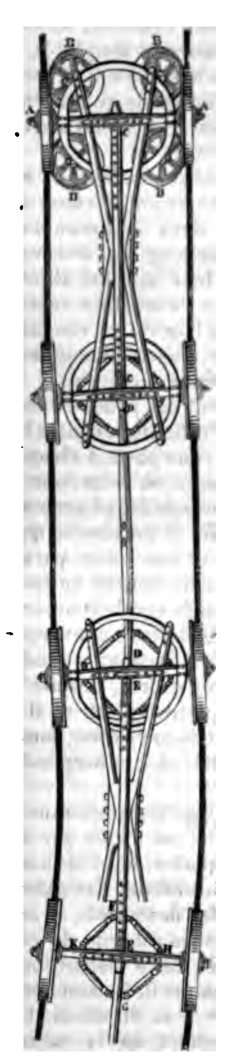


Fig. 261.

pour diriger tous les essieux intermédiaires. Les wagons, au lieu d'être attachés les uns aux autres par des chaînes à ressorts, comme sur les chemins de fer ordinaires, sont réunis par des barres rigides, ou *timons*, aboutissant aux chevilles ouvrières, autour desquelles ces barres peuvent tourner librement. Ainsi, à la suite de la *flèche* CC, qui réunit les deux chevilles ouvrières du premier wagon (fig. 261) se trouve un timon DD reliant la seconde cheville ouvrière

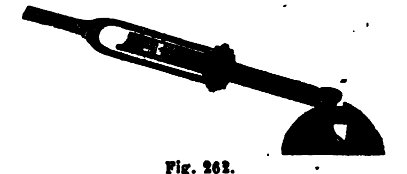


Fig. 262.

du premier wagon à la première du second wagon ; de même, à la suite de la flèche EE du second wagon, se trouve un timon EG servant à relier le second wagon au troisième, et ainsi de suite. Il résulte de cette disposition que les flèches et les timons, dont les longueurs sont les mêmes, forment un polygone à côtés égaux, ayant pour sommets les les diverses chevilles ouvrières ; et puisque ces sommets se trouvent toujours sur la ligne courbe qui forme comme l'axe de la voie de fer, le polygone dont il s'agit est inscrit dans cette ligne courbe. On comprend dès lors que, pour amener chaque essieu à être dirigé perpendiculairement à la voie, il suffit de l'obliger à faire toujours des angles égaux avec la flèche et le timon qui aboutissent à son milieu. On y parvient au moyen de quatre barres de même longueur, articulées d'une part en F et G à la flèche et au timon, et d'une autre

part en H et K à deux manchons qui enveloppent l'essieu et qui peuvent l'un et l'autre glisser d'une certaine quantité dans le sens de sa longueur. Le losange FHGK, dont ces quatre barres sont les côtés, est donc susceptible de se déformer ; et il se déforme en effet lorsque la flèche et le timon qui portent les sommets F, G, viennent à changer de direction l'un par rapport à l'autre. Alors les manchons H, K glissent le long de l'essieu, et le font mouvoir en même temps autour de la cheville ouvrière, de manière à le placer toujours suivant la diagonale HK du losange. On conçoit d'après cela que, quel que soit l'angle de la flèche avec le timon, l'essieu sera toujours également incliné sur chacun d'eux, et que par conséquent il ne cessera pas d'être dirigé perpendiculairement à la voie.

Cette dernière disposition, relative aux essieux intermédiaires, n'est pas celle que M. Arnoux avait imaginée tout d'abord, et qu'il a appliquée à la construction des wagons du chemin de fer de Paris à Sceaux. Par sa simplicité, elle est de beaucoup préférable à la disposition primitive, que nous ne décrirons pas. L'idée de cette amélioration lui a été suggérée par un de ses fils.

Un convoi d'une longueur quelconque, dont les wagons sont construits d'après le système de M. Arnoux, peut s'engager dans des parties courbes ou sinueuses d'un chemin de fer, où la courbure de la voie peut changer assez rapidement, sans que les essieux cessent d'être perpendiculaires à la voie. La facilité avec laquelle le convoi se replie suivant tous les contours du chemin fait qu'on désigne souvent le système de M. Arnoux sous le nom de *système de wagons articulés.*

§ 189. Il arrive souvent qu'une voie de fer se bifurque, c'est-à-dire qu'elle donne naissance à deux voies distinctes, qui s'écartent l'une de l'autre, et dont chacune peut être regardée comme le prolongement de la première. Lorsqu'un convoi de wagons marche de la voie unique vers cette double voie, il faut qu'on puisse le faire entrer à volonté sur l'une ou sur l'autre des deux nouvelles voies. On y parvient à l'aide des *aiguilles,* dont nous allons donner la description, et qui sont représentées par la figure 263.

Cette figure est disposée de manière qu'un convoi, arrivant par la partie inférieure, suive les rails AA, BB. Les rails A′ et B′ forment le commencement de la seconde voie, dans laquelle le convoi ne peut nullement s'engager. Deux bouts de rails CD, EF, qui sont amincis à leurs extrémités D, F, peuvent tourner autour de leurs autres extrémités C, E ; c'est ce que l'on nomme les aiguilles. Une tige de fer G, attachée à l'aiguille EF, est destinée à tirer cette aiguille, de manière à appliquer son extrémité F

contre le rail BB, en la faisant tourner autour du point E : en même temps une seconde tige de fer H, attachée à l'aiguille EF, entraîne l'autre aiguille CD, pour la détacher du rail contre lequel elle est appuyée. Alors le convoi, arrivant toujours par la partie inférieure de la figure, ne suit plus la même voie que tout à l'heure, et s'engage sur les rails A′ et B′. Il suffit donc de tirer la tige de fer G ou de la pousser, dans le sens de sa longueur, pour que le convoi s'avance sur l'une ou l'autre des nouvelles voies qui font suite à celle par laquelle il est arrivé. Le contre-rail K est destiné à prévenir le déraillement, au moment où les roues des wagons viennent passer sur les aiguilles.

On agit sur la tige de fer G

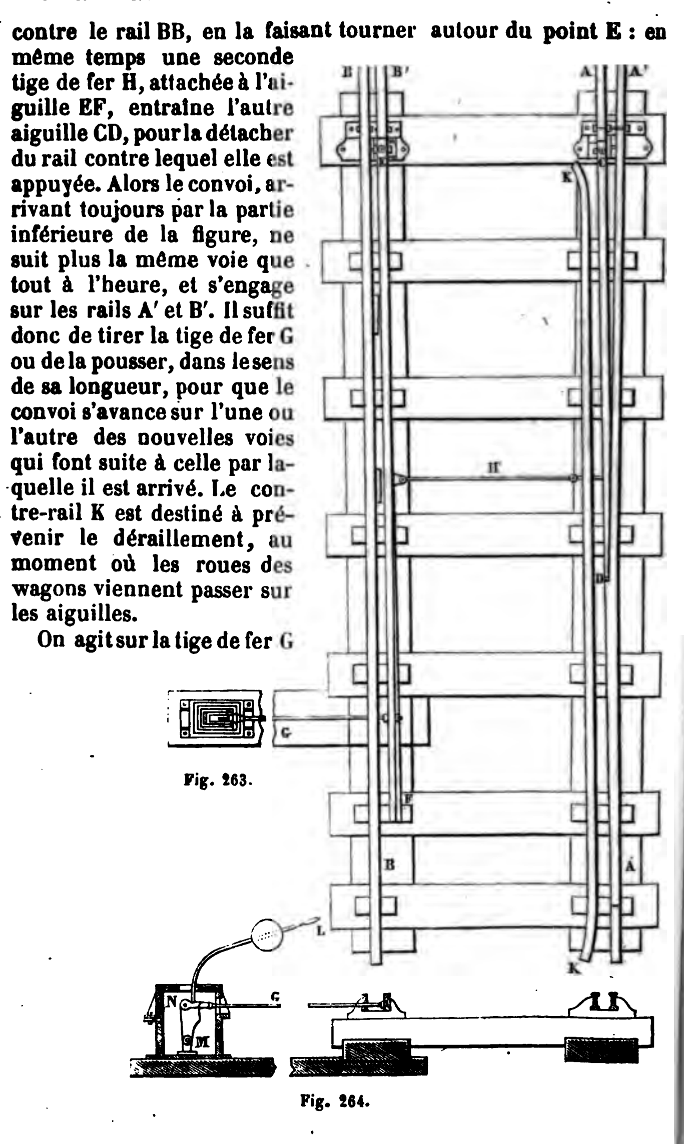


Fig. 263.

Fig. 264.

G, à l'aide du levier LMN (fig. 264), dont le point fixe est en M. En relevant l'extrémité L de ce levier, on tire la tige de fer G, qui est articulée en N; en la rabaissant ensuite, pour lui rendre la position qu'indique la figure 264, les aiguilles reprennent leur position primitive, c'est-à-dire celle que montre la figure 263. La masse de fonte qui est adaptée au levier, tout près de la poignée L qui le termine, est destinée à le maintenir dans cette position, sans qu'on ait besoin de s'en occuper; on ne doit agir sur le levier, et par suite sur les aiguilles, que dans les circonstances accidentelles où l'on veut que le convoi passe sur les rails A', B'.

Lorsque deux voies parallèles existent à côté l'une de l'autre, et qu'on peut avoir besoin de faire passer les convois de l'une à l'autre, on les relie par une troisième voie qui vient se raccorder avec chacune d'elles (fig. 265). On dispose, aux deux points de raccordement, des aiguilles à l'aide desquelles on peut engager les convois dans cette voie accessoire pour les transporter de l'une des deux voies principales sur l'autre. D'ailleurs les leviers qui servent à manœuvrer ces aiguilles sont munis de contre-poids, qui les maintiennent dans une position telle, que les deux voies principales soient dans les mêmes conditions que si la voie accessoire n'existait pas.



Fig. 265.

§ 190. Dans les gares, on a besoin souvent de faire passer des wagons d'une voie sur une autre, et l'on ne peut pas disposer de tout l'espace que nécessite une voie de raccordement

telle que celle que nous venons d'indiquer. Alors on se sert de plaques tournantes. La figure 266 représente une de ces plaques, toute de fonte, qui porte sur sa surface deux portions de voies de

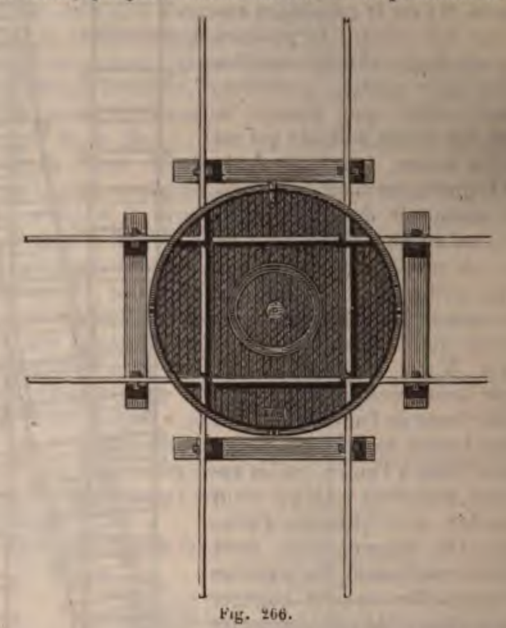


Fig. 266.

fer, dirigées à angle droit l'une sur l'autre. Cette plaque est installée en un point d'une voie principale, de telle manière qu'une des deux portions de voie qu'elle porte fasse partie de cette voie principale. Une voie accessoire, perpendiculaire à la première, se raccorde avec la seconde portion de voie que porte la plaque. Lorsqu'un wagon, circulant sur la voie principale, a été amené sur la plaque, on la fait tourner d'un angle droit, autour d'un axe vertical qui passe par son centre: alors il suffit de faire marcher le wagon, pour qu'il s'engage dans la petite voie transversale. On peut ainsi conduire ce wagon dans d'autres parties de la gare, auxquelles aboutit la voie accessoire; ou bien l'amener sur une seconde plaque tournante, à l'aide de laquelle on l'installera sur une seconde voie principale parallèle à la première.

La figure 267 montre les galets qu'on place au-dessous des pla-

ques tournantes, pour les soutenir et s'opposer aux frottements considérables qui se produiraient sans leur présence, pendant qu'on fait tourner ces plaques avec la charge qu'elles supportent. Ces galets, en forme de troncs de cône, sont adaptés à une monture indépendante de la plaque, et formée de tiges de fer qui rayonnent tout autour d'un collier central : la plaque les entraîne



Fig. 267.

dans son mouvement, en les faisant rouler : mais ils ne marchent pas aussi vite qu'elle, et ne font qu'un tour autour de son axe, pendant qu'elle en fait deux. Ils se comportent comme les rouleaux dont nous avons parlé dans le § 182.

§ 191. On emploie généralement comme moteurs, pour faire mouvoir les convois sur les chemins de fer, des machines à vapeur locomotives, que l'on nomme par abréviation des *locomotives*. Nous verrons plus tard quelle est la disposition de ces machines ; pour le moment nous devons nous contenter de savoir qu'une locomotive est une machine à vapeur montée sur des roues, et que l'action de la vapeur est exclusivement employée à faire tourner un des essieux qui correspondent à ces roues. Une locomotive est ordinairement supportée par six roues, et a par conséquent trois essieux. C'est l'essieu du milieu qui reçoit un mouvement de rotation de la machine, et les roues qui sont fixées à ses deux extrémités participent à ce mouvement ; quant aux quatre autres roues, elles servent simplement à soutenir la machine, et à la maintenir sur la voie de fer, pendant qu'elle est en mouvement.

Supposons qu'une locomotive, placée sur une voie de fer, y soit arrêtée par des obstacles qui l'empêchent d'avancer. Lorsqu'on fera agir la vapeur, l'essieu du milieu tournera, avec les deux roues qui la terminent, et que l'on nomme les *roues motrices* ; ces roues glisseront sur les rails, et il en résultera un frottement d'autant plus grand que la pression qu'elles exercent sur les rails sera plus forte. Si la locomotive était libre d'avancer, ce frottement ne se produirait pas ; les roues motrices rouleraient au lieu de glisser, et entraîneraient avec elles toute la machine. Pour que la locomotive reste immobile, il faut donc qu'elle soit soumise à une force résistante égale au frottement que cette immo-

bilité détermine. Une résistance inférieure à ce frottement, étant appliquée à la locomotive, ne suffira pas pour l'arrêter, et sera par conséquent vaincue par elle. Il résulte de là qu'une locomotive est capable d'exercer une force de traction égale à la force de frottement que ses roues motrices exerceraient sur les rails, dans le cas où on l'empêcherait d'avancer ; et toutes les fois qu'elle sera mise en tête d'un convoi de wagons, pour lequel cette force de traction sera suffisante, elle l'entraînera dans son mouvement.

La puissance d'une locomotive dépend donc essentiellement de la pression que ses roues motrices exercent sur le chemin. Il est vrai qu'il faut que la machine soit disposée de manière que la vapeur puisse y développer toute la force nécessaire à la traction que la locomotive doit exercer ; mais cette force ne peut se transmettre à un convoi que par l'adhérence des roues motrices avec les rails. La machine à vapeur pourrait avoir une très-grande force, et n'être capable d'exercer qu'une médiocre traction, si les roues motrices n'exerçaient qu'une faible pression sur les rails.

Nous avons vu (§ 43) que, lorsqu'un corps pesant s'appuie sur un plan horizontal par plus de trois points, les pressions qu'il exerce en ses divers points d'appui ne dépendent pas seulement de son poids et de la place qu'occupe son centre de gravité par rapport à ces points : ces pressions dépendent aussi de la flexibilité plus ou moins grande des diverses parties du corps, ainsi que du plan sur lequel il s'appuie. C'est ce qui arrive pour une locomotive, dont les six roues supportent toute la machine par l'intermédiaire de ressorts de suspension ; la pression exercée par une de ces roues sur le rail est d'autant plus grande, que le ressort qui lui correspond est plus fort. Aussi donne-t-on une grande force aux ressorts des deux roues motrices, afin de leur faire supporter à elles deux une grande portion du poids total de la locomotive. D'un autre côté on construit la machine de manière qu'elle ait un poids considérable ; et l'on arrive ainsi à déterminer une grande adhérence des roues motrices sur les rails, c'est-à-dire à permettre à la locomotive d'exercer une grande force de traction. On peut évaluer à environ 25 000 kilogrammes le poids d'une locomotive, telle qu'on les construit maintenant.

Pour augmenter la puissance de traction d'une locomotive, on relie souvent les roues motrices à deux des quatre autres roues, ou même à toutes les quatre à l'aide de bielles qui sont articulées sur deux rayons de ces roues (fig. 268). Les roues, ainsi réunies par ces bielles, prennent le nom de *roues couplées*. A l'aide de cette disposition, les roues motrices ne peuvent pas tourner, sans *faire tourner* en même temps celles auxquelles elles sont liées ;

et ce n'est plus seulement l'adhérence des roues motrices sur les rails qui détermine la limite que la force de traction ne peut pas dépasser; mais c'est l'adhérence de ces roues et de celles qu'elles entraînent nécessairement dans leur mouvement. Il est aisé de

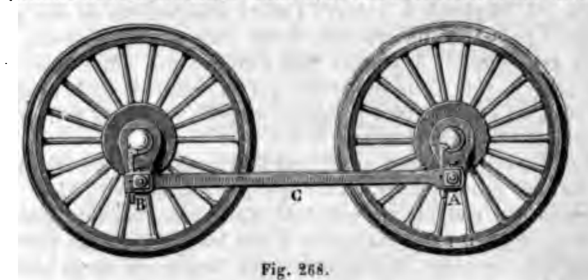


Fig. 268.

reconnaître que des roues ne peuvent être couplées qu'autant qu'elles ont le même diamètre, puisqu'elles doivent faire le même nombre de tours dans un même intervalle de temps.

Si toutes les roues d'une locomotive sont couplées, et que son poids soit de 25 000 kilogrmmes, on pourra compter qu'elle sera capable d'exercer une force de traction de 2 500 kilogrammes; car le rapport du frottement à la pression, dans le glissement de fer sur fer, ne peut guère descendre au-dessous de 0,1. En admettant donc que cette force soit appliquée à un convoi de wagons, dont les essieux soient convenablement graissés, et pour lesquels le tirage ne soit que les 0,005 de leur poids (§ 185), on voit que la locomotive sera capable de traîner, sur un chemin de fer horizontal, un convoi pesant 500 000 kilogrammes.

§ 192. Les chemins de fer sont rarement horizontaux dans une grande longueur; ils sont formés ordinairement d'une suite de parties horizontales, séparées par des parties inclinées, les unes dans un sens, les autres en sens contraire. Les convois ont donc souvent à monter des pentes: aussi les locomotives ne peuvent-elles pas traîner des poids aussi énormes que celui que nous venons de trouver, à cause de l'action de la pesanteur qui, dans les montées, absorbe une portion de la force de traction qu'elles sont capables d'exercer.

En même temps que le tirage d'un convoi augmente, lorsqu'il passe d'une partie horizontale du chemin sur une partie montante, la force de traction que la locomotive peut exercer diminue. En effet, sur un chemin incliné, son poids se décompose en deux forces, dont l'une est parallèle au chemin, et l'autre lui est

perpendiculaire. L'adhérence des roues motrices sur les rails est déterminée par cette dernière composante seule, et est par conséquent plus faible que lorsque le chemin est horizontal; et, en outre, lorsque la locomotive monte, une portion de cette adhérence est employée à vaincre l'autre composante de son poids. Aussi la puissance de traction d'une locomotive diminue-t-elle assez rapidement, à mesure que l'inclinaison augmente; et si l'on joint à cela l'augmentation qui en résulte pour le tirage des convois, on comprendra pourquoi on évite les fortes pentes dans la construction des chemins de fer.

On peut se demander quelle est l'inclinaison qu'un chemin de fer ne doit pas dépasser, pour qu'une locomotive puisse y remorquer des convois, en montant. Cette question est facile à résoudre. Supposons qu'il s'agisse d'une locomotive dont toutes les roues sont couplées, et concevons que toutes ces roues aient été rendues fixes, de manière à ne pas pouvoir tourner. Si l'on place la locomotive, dans cet état, sur une voie de fer inclinée, et que l'action de la pesanteur ne la fasse pas descendre, en faisant glisser ses roues sur les rails, on peut être certain qu'elle montera, lorsque ses roues, rendues mobiles, seront mises en mouvement dans un sens convenable, par l'action de la vapeur. Or, pour que la locomotive, avec ses roues fixes, ne glisse pas sur ce plan incliné, sous l'action de la pesanteur, il faut que le rapport de la hauteur du plan incliné à sa base (§ 63) ne soit pas plus grand que le rapport du frottement à la pression dans le glissement de fer sur fer. Si le premier rapport est égal au second, la locomotive pourra monter, mais elle ne sera capable d'exercer aucune force de traction sur d'autres corps; si le premier rapport est plus petit que le second, elle pourra exercer une force de traction d'autant plus grande que la différence entre ces deux rapports sera elle-même plus grande.

La partie du chemin de fer de Paris à Saint-Germain qui avoisine cette dernière ville, présente une rampe dont l'inclinaison est de $0^m,035$ par mètre, et qui a été construite pour conduire les voyageurs presque au niveau du sol de la ville, à l'aide du système atmosphérique dont nous parlerons plus tard. Depuis quelques temps les convois sont remorqués sur cette rampe par des locomotives.

§ 193. Un des grands avantages des chemins de fer, sur les routes ordinaires, consiste dans la rapidité du mouvement qu'on peut donner aux convois. Cet avantage est dû uniquement à l'emploi des machines à vapeur, au lieu de chevaux, comme moteurs. En effet, un cheval attelé à une voiture ne peut pas donner une

vitesse plus grande que celle qu'il est capable de prendre lorsqu'il court sans charge ; et encore est-on obligé de le faire marcher moins vite qu'il ne le ferait en pareil cas, afin qu'il ne se fatigue pas trop tôt. Tandis qu'avec une machine à vapeur, on peut accélérer le mouvement d'un convoi de wagons autant qu'on veut. En admettant, par exemple, que la machine à vapeur, pour fonctionner convenablement, ne doive pas faire tourner l'essieu des roues motrices avec une rapidité supérieure à une certaine limite, il suffirait d'augmenter le diamètre de ces roues, pour que la rapidité du mouvement du convoi pût devenir aussi grande qu'on voudrait, puisque, pour chaque tour de l'essieu, le convoi avance d'une quantité égale à la longueur de la circonférence des roues motrices. La vitesse avec laquell[illegible] ivois circulent sur les chemins de fer, en France, est de [illegible] kilomètres par heure : en y comprenant les temps d'[illegible] tions, on doit compter sur une vitesse moyenne d'env[illegible] kilomètres par heure.

§ 194. Pour arrêter les convois en mouvement on arrê[illegible] de la vapeur, et l'on se sert de freins, à l'aide desquels on [illegible] les résistances passives. Ces freins sont disposés autreme[illegible] pour les voitures ordinaires, mais ils agissent d'une manière a[illegible] gue, en exerçant un frottement sur le contour des roues. Ce sont ordinairement deux morceaux de bois placés entre deux roues d'un même wagon (fig. 269) et taillés de manière à embrasser une

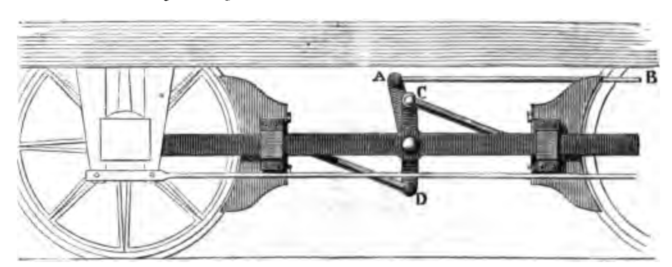


Fig. 269.

portion du contour de chacune de ces roues. Une tringle A B est disposée de manière à agir sur le levier CD, mobile autour de l'axe E. La tringle AB est articulée en A, à un bras de levier fixé à cet axe ; et en tirant cette tringle de A vers B, on appuie les deux morceaux de bois contre les roues, par l'intermédiaire de tiges de fer qui sont articulées d'une part aux deux extrémités du levier CD, et d'une autre part à ces deux morceaux de bois.

Ce genre de frein, qui est généralement adopté, offre le mê

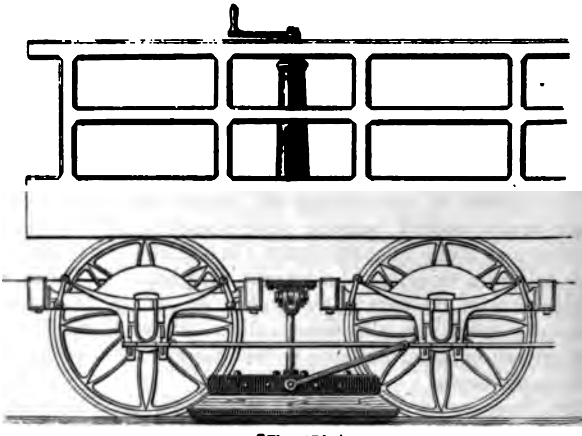


Fig. 270.

inconvénient que le frein des voitures ordinaires. Lorsqu'on

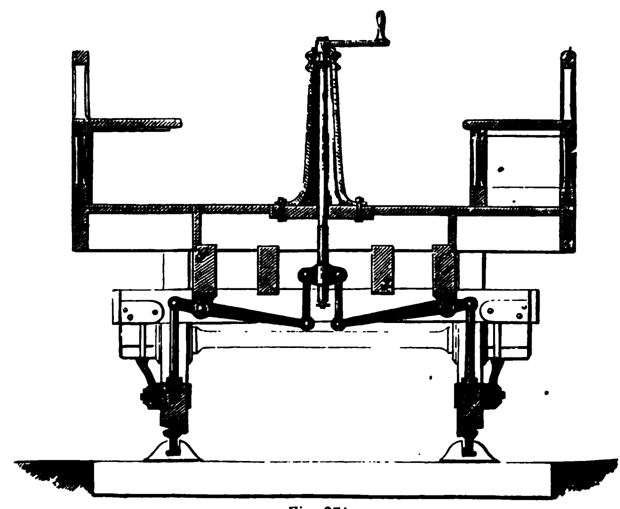


Fig. 271.

serre assez fortement pour empêcher les roues de tourner, ell

glissent sur les rails, s'usent en un seul point de leur contour, et deviennent irrégulières. Pour obvier à cet inconvénient, M. Laignel a proposé de remplacer le frein ordinaire par celui que représentent les figures 270 et 271. Ce frein consiste en deux espèces de patins, qui sont placés des deux côtés d'un wagon entre les roues qui les supportent, et qu'on tient habituellement suspendus entre ces roues, au-dessus des rails, sans qu'ils les touchent en aucune manière. Lorsqu'on veut faire agir le frein, on fait tourner une manivelle qui correspond à une vis : l'écrou, qui est engagé dans cette vis, s'élève, et il abaisse en même temps les deux patins, par l'intermédiaire de deux leviers (fig. 271). Ces patins viennent alors s'appuyer sur les rails, d'autant plus fortement qu'on a fait tourner davantage la manivelle ; et il en résulte un frottement qui tend à ralentir la marche du wagon. Le frottement qui se développe ainsi peut devenir presque aussi intense que celui qui se produit lorsqu'on empêche les roues de tourner, à l'aide du frein ordinaire ; il suffit pour cela d'abaisser les deux patins, de manière à leur faire supporter presque tout le poids du wagon. Les patins sont munis inférieurement d'une garniture de fer, qui présente un rebord analogue aux boudins des roues, afin d'éviter le déraillement au moment où l'on manœuvre le frein, et où les roues ne s'appuient presque plus sur les rails. Ce frein de M. Laignel a été employé avec avantage sur plusieurs chemins de fer, et notamment sur les plans inclinés de Liége.

§ 195. La résistance qui s'oppose au roulement des wagons sur un chemin de fer est une si petite fraction de leur poids, que l'inclinaison du chemin n'a pas besoin d'être bien grande, pour qu'ils puissent descendre le long de ce chemin sous la seule action de leur poids. On sait, en effet, qu'il suffit pour cela que la composante du poids, dirigée parallèlement au chemin, soit capable de vaincre les résistances passives qui s'opposent au mouvement (§ 186). Aussi n'est-il pas rare de trouver, sur les chemins de fer, des endroits où la pente, sans être bien forte, est assez prononcée pour que le mouvement des convois puisse se continuer sans qu'on fasse agir la vapeur ; et l'on est même quelquefois obligé en pareil cas, de se servir des freins, pour empêcher la vitesse de devenir trop grande. On peut citer, comme un exemple remarquable, la portion du chemin de fer de Saint-Étienne à Lyon, qui est comprise entre la première ville et Givors ; les wagons parcourent toute cette portion du chemin, dont la longueur est de plus de 36 kilomètres, en vertu de la seule action de la pesanteur, et par conséquent sans qu'on ait besoin de mettre des locomotives en tête des convois. La pente est de $0^m,013$ par mètre

de Saint-Étienne à Rive-de-Gier, et seulement de 0m,005 par mètre de Rive-de-Gier à Givors. Pendant ce parcours, on se sert constamment des freins pour modérer la vitesse des convois. C'est ce qui a lieu encore sur la rampe du chemin de fer de Paris à Saint-Germain, dont nous avons déjà parlé : les convois qui partent de Saint-Germain descendent toute la rampe sous la seule action de leur poids, et ce n'est qu'au bas de cette rampe qu'on les attache à des locomotives, qui doivent les conduire jusqu'à Paris.

§ 196. **Plans inclinés automoteurs.** — Lorsque des wagons doivent descendre chargés, le long d'un chemin de fer incliné, et remonter sans charge le long du même chemin, on peut profiter de la descente des wagons chargés pour remonter les wagons vides. Pour cela, on attache deux wagons aux deux extrémités d'une corde, que l'on fait passer dans la gorge d'une grande poulie horizontale, installée au haut du plan incliné (fig. 272 et 273). Les deux portions de cette corde, en quittant la poulie, se dirigent suivant les axes de deux voies de fer parallèles, sur lesquelles doivent se mouvoir les deux wagons. La pesanteur, en agissant sur les deux wagons, tend à faire descendre chacun d'eux le long de la voie inclinée sur laquelle il est posé : mais la corde qui les réunit s'oppose à ce qu'il en soit ainsi. Décomposons les poids des deux wagons, comme nous l'avons déjà fait plusieurs fois, en leurs composantes parallèles et perpendiculaires au chemin. Les premières, celles qui sont parallèles au chemin, agissent aux deux extrémités de la corde, et ce sont ces forces qu'il faut considérer, pour savoir s'il y aura équilibre ou mouvement, et, dans ce dernier cas, quel sera le sens du mouvement. Si les wagons étaient également pesants, ces forces seraient égales, et la corde resterait immobile. Mais, si l'un des wagons est chargé et l'autre vide, la composante du poids du premier l'emportera sur celle du poids du second ; le wagon chargé descendra et fera remonter le wagon vide.

Le mouvement ainsi produit est tout à fait analogue à celui que nous avons observé dans la machine d'Atwood (§ 85) ; la vitesse augmenterait donc constamment, si l'on n'avait soin de la modérer, à l'aide d'un frein appliqué à la grande poulie. Le frein se compose de deux mâchoires de bois A, A, dont chacune embrasse une portion de la circonférence d'un tambour adapté à la face supérieure de la poulie. Ces mâchoires sont mobiles autour de boulons qui les traversent à l'une de leurs extrémités ; et leurs autres extrémités peuvent être rapprochées l'une de l'autre par le moyen d'un levier BC, mobile autour du point C, et agissant

sur deux tringles de fer qui lui sont articulées, de part et d'autre du point C.

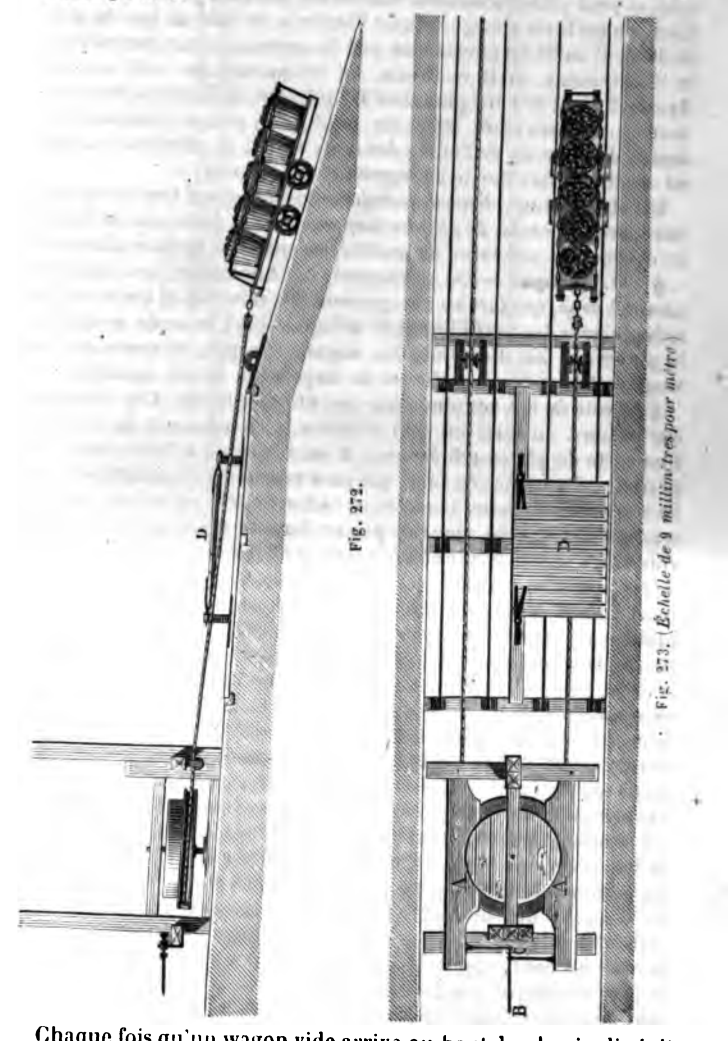


Fig. 272.

Fig. 273. (Échelle de 9 millimètres pour mètre)

Chaque fois qu'un wagon vide arrive au haut du plan incliné, il

monte jusque sur une partie du chemin qui est presque horizontale, et peut y être facilement maintenu, pendant qu'on le charge. Lorsque qu'il est chargé, et que l'autre a été vidé au bas du plan incliné, il suffit de pousser un peu le premier, pour commencer le mouvement, et il continue de lui-même. On voit sur les figures 272 et 273 un plancher D, qu'on peut faire tourner autour d'un de ses côtés, et qu'on peut ainsi placer à volonté au-dessus de l'une ou de l'autre des deux voies ; ce plancher mobile est destiné à faciliter le chargement des wagons.

Un plan incliné, disposé comme celui que nous venons de décrire, prend le nom de *plan incliné automoteur*. Celui qui est figuré ici existe dans une mine de houille des environs de Saint-Étienne.

§ 197. **Drops.** — On a imaginé, en Angleterre, un appareil nommé *drop*, qui sert au chargement des navires, et qui a de l'analogie avec les plans inclinés automoteurs ; la seule action de la pesanteur fait descendre les wagons chargés, et remonter les wagons vides. Voici quelle est la disposition de cet appareil.

Une voie de fer, soutenue par une charpente (fig. 274) s'avance sur le bord du quai où doit s'opérer le chargement du navire. Une sorte de plateau de balance B est suspendu à l'extrémité supérieure d'un cadre de bois, qui peut tourner à charnière autour de son côté inférieur. Lorsque ce cadre mobile est relevé, le plateau qu'il supporte vient se placer dans le prolongement de la voie de fer : en sorte que chaque wagon peut passer très-facilement de cette voie sur le plateau. Si le cadre mobile s'abaisse, en tournant autour de la charnière qui le termine inférieurement, le plateau vient se poser sur le pont du navire, qu'on a convenablement placé pour cela. La partie supérieure du cadre mobile est retenue par un câble G, qui s'enroule sur un arbre C ; aux deux extrémités de cet arbre, de part et d'autre de la voie de fer, s'enroulent, en sens contraire, deux câbles F, qui supportent inférieurement deux contre-poids D. Ces contre-poids ne sont pas simplement suspendus aux câbles F, mais ils sont encore attachés à des tringles de bois E, mobiles autour de leurs extrémités supérieures.

Lorsque le plateau B est placé dans le prolongement de la voie de fer, et qu'on amène un wagon chargé sur ce plateau, le poids du wagon le fait descendre, en abaissant le cadre mobile. Le câble G se déroule sur l'arbre C, auquel il communique un mouvement de rotation ; ce mouvement fait enrouler les câbles F, et monter les contre-poids D. Aussitôt que le wagon, porté ainsi sur le pont du navire, y a été déchargé, il ne se trouve plus assez pesant pour faire équilibre aux contre-poids D ; ceux-ci redescendent ; les câbles F font tourner l'arbre C en sens contraire, en se

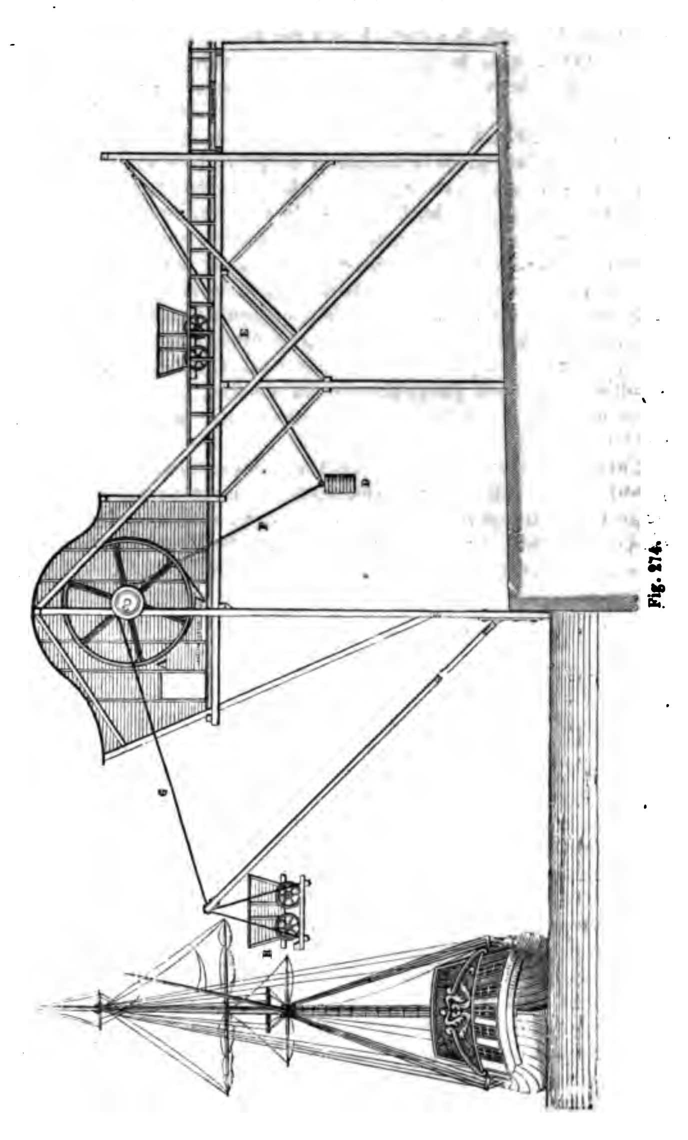


Fig. 274.

déroulant ; le câble G s'enroule sur cet arbre, et relève ainsi le cadre mobile, avec le plateau et le wagon vide. On emmène ce wagon, pour le remplacer par un autre plein, et la manœuvre recommence.

Les tringles E, auxquelles les contre-poids D sont attachés, sont destinées à faire varier la tension que ces contre-poids communiquent aux câbles F. Par cette disposition, la tension des câbles F est d'autant plus grande, que l'axe de rotation du cadre mobile est plus éloigné de la verticale qui passe par le centre de gravité du wagon placé sur le plateau. On n'a pas cherché par là à établir un équilibre entre le poids du wagon et les contre-poids ; cet équilibre ne doit pas avoir lieu, puisqu'il faut que le poids du wagon chargé l'emporte sur les contre-poids, et qu'au contraire ceux-ci l'emportent sur le poids du wagon vide : mais on a voulu régulariser, jusqu'à un certain point, la grandeur de la force excédante qui produit ce mouvement, soit dans un sens, soit dans l'autre.

L'arbre C porte un tambour A, autour duquel est disposé un frein pareil à celui que nous avons décrit dans le paragraphe 141 (page 190). Un ouvrier agit sur ce frein, à l'aide d'un levier qui est ponctué sur la figure, et empêche ainsi la vitesse du wagon de devenir trop grande, soit lorsqu'il descend, soit lorsqu'il remonte.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MOTEURS.

§ 198. D'après ce que nous avons vu, une machine ne peut se mettre en mouvement, et effectuer du travail utile, qu'autant qu'elle est soumise à l'action d'une puissance. Tout ce qui est capable d'exercer cette puissance s'appelle, en général, un *moteur*. Il y a diverses espèces de moteurs, que nous allons indiquer successivement.

1° L'homme et les animaux sont très-souvent employés pour faire mouvoir des machines : on les désigne, dans ce cas, sous le nom de *moteurs animés*.

2° Les ressorts, tels que ceux qui font marcher les pendules et les montres, sont des moteurs. Il est vrai qu'un ressort ne peut agir sur une machine qu'autant qu'il est tendu, et qu'il faut pour cela qu'un autre moteur ait préalablement agi sur lui : mais dès le moment qu'il est tendu, peu importe que sa tension ait été produite par telle ou telle cause ; il n'en doit pas moins être considéré comme un moteur capable de faire mouvoir une machine, et de vaincre les résistances qui lui sont appliquées.

3° On emploie encore, comme moteurs, des corps pesants tom-

bant d'une certaine hauteur. Nous en avons vu des exemples dans les horloges, et dans les plans inclinés automoteurs.

4° Les cours d'eau servent de moteurs dans une foule de circonstances : en agissant sur des roues hydrauliques, ils font mouvoir une quantité innombrable de moulins, de forges, de filatures, de scieries, et en général, d'ateliers de toute espèce.

5° Le mouvement de l'air, ou ce que l'on nomme le vent, est utilisé dans les moulins à vent, et forme ainsi un moteur très-répandu.

6° La force élastique que la chaleur communique à la vapeur d'eau, et, en général, aux vapeurs des liquides qui se volatilisent facilement, et même aux gaz, fournit un moteur extrêmement précieux, et dont l'usage, encore récent, prend un développement considérable.

7° Un gaz qui a été fortement comprimé peut faire mouvoir une machine en agissant de la même manière qu'un ressort : ce genre de moteur est peu employé.

8° Enfin, l'électricité doit être rangée parmi les moteurs, comme nous le verrons lorsque nous nous occuperons des machines électromotrices ; mais son usage, sous ce point de vue, est jusqu'à présent très-restreint.

§ 199. Les divers moteurs qui viennent d'être énumérés ici sont loin d'avoir le même degré d'importance. Au point de vue de l'industrie, on peut dire qu'il n'y a, en réalité, que quatre moteurs, savoir : 1° les moteurs animés ; 2° les cours d'eau ; 3° le vent ; 4° la vapeur.

Ces moteurs ne peuvent, en général, exercer leur action que par l'intermédiaire d'une machine spéciale, qui n'a d'autre objet que de leur permettre de développer leur puissance, et de la transmettre ensuite aux mécanismes auxquels les résistances sont appliquées. Les machines de ce genre sont désignées sous le nom de *machines motrices* : telles sont, par exemple, les roues hydrauliques et les machines à vapeur.

L'étude d'un moteur peut être faite sous deux points de vue différents. On peut d'abord considérer le moteur en lui-même, sans s'occuper des moyens d'utiliser son action. On arrive ainsi à se faire une idée nette de la quantité totale de travail qu'il est capable d'effectuer dans un temps donné, quantité qui ne peut jamais être dépassée, quelle que soit la disposition de la machine à laquelle il est appliqué. Mais on peut aussi ne pas séparer le moteur de sa machine motrice, et c'est ce qu'on fait habituellement, afin de se rendre compte de la quantité de travail dont on peut réellement disposer par l'emploi de cette machine. En comparant

ensuite le résultat ainsi obtenu avec celui qu'on avait trouvé quand on avait considéré le moteur seul, indépendamment de la machine motrice, on est en mesure de juger du degré de perfection de cette machine, d'après la portion plus ou moins grande de la puissance totale du moteur qu'elle aura rendue disponible.

L'étude d'un moteur en lui-même se fera en examinant de quelle manière il peut agir, quelle force il est capable de déployer à chaque instant, quel chemin parcourt le point d'application de cette force suivant sa direction même. On trouvera ainsi des résultats différents, suivant qu'il s'agira de tel ou tel moteur. Si l'on s'occupe d'une chute d'eau, la connaissance de la hauteur de la chute, et de la quantité d'eau qu'elle fournit en une heure, conduira à la mesure de la puissance de cette chute, puissance qui sera entièrement déterminée. S'il s'agit d'un moteur animé, d'un homme, par exemple, on reconnaîtra au contraire que sa puissance est très-variable : ainsi que nous le verrons bientôt, cette puissance sera plus ou moins grande, suivant que l'homme agira avec ses mains ou avec ses pieds, qu'il tirera ou qu'il poussera, qu'il exercera sa force verticalement ou horizontalement. Dans tous les cas, pour arriver à ces divers résultats, il suffira d'employer les moyens qui nous sont déjà connus. On évaluera les forces développées par les moteurs pendant leur action, à l'aide de dynamomètres, et l'on déterminera la grandeur du chemin parcouru par le point d'application de chacune d'elles suivant sa direction, soit en le mesurant directement, soit en ayant recours à des moyens particuliers faciles à imaginer.

Quant à la mesure de la quantité de travail que la machine motrice rend disponible, nous allons voir comment on l'effectue habituellement.

§ 200. **Frein dynamométrique.** — Dans la plupart des cas, une machine motrice fait tourner un arbre, et c'est ce mouvement de rotation qui est ensuite utilisé pour vaincre des résistances de toutes sortes. C'est ainsi qu'une roue hydraulique reçoit directement de l'action de l'eau un mouvement de rotation auquel participe l'arbre qui la supporte ; cet arbre fait ensuite mouvoir des meules, des scies, des marteaux, etc. De même, une machine à vapeur qui fonctionne dans un atelier donne un mouvement de rotation à un arbre horizontal qu'on nomme *arbre de couche*, et c'est sur cet arbre de couche qu'on prend le mouvement qui doit être transmis à chacune des machines-outils qui doivent effectuer les travaux auxquels l'atelier est destiné. Lorsqu'on veut mesurer la puissance de la machine motrice, on supprime toute communication de l'arbre qu'elle fait tourner avec les machi-

nes-outils, et en général avec les résistances à vaincre ; puis on applique à cet arbre une résistance artificielle, que l'on puisse facilement évaluer. En faisant varier la grandeur de cette résistance, on peut faire en sorte que le mouvement de la machine soit celui qu'elle prend habituellement, et que d'ailleurs elle se trouve exactement dans les mêmes conditions, quant à la manière dont elle reçoit l'action du moteur. Dès lors il suffit de déterminer la quantité de travail développé par la machine pour vaincre cette résistance, et l'on a ainsi la mesure du travail que cette machine effectue dans les circonstances ordinaires.

Pour produire la résistance artificielle dont on vient de parler, on se sert du *frein dynamométrique*, ou *frein de Prony*, du nom de son inventeur. Cet appareil est représenté par la figure 275. A est

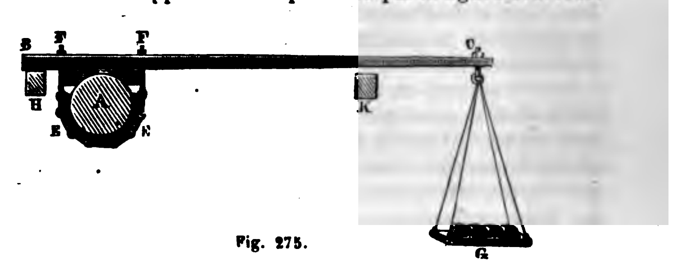


Fig. 275.

l'arbre horizontal auquel le frein est appliqué. La surface de cet arbre doit être pour cela exactement cylindrique; lorsque cela n'a pas lieu, on y adapte un manchon de fonte, que l'on fixe à l'aide de boulons, de telle façon que sa surface ait tous ses points également éloignés de l'axe de rotation, ou, comme on dit, que sa surface soit bien centrée. Un levier de bois BC est garni d'un morceau de bois D, dont la face inférieure est taillée de manière à emboîter une portion de la surface de l'arbre, ou du manchon s'il y en a un. Une chaîne EE, formée de plaques de tôle articulées les unes aux autres, est également garnie de petits morceaux de bois, qui viennent s'appliquer sur la partie inférieure de la même surface; cette chaîne se termine par deux boulons à vis, qui traversent le levier BC, et dans les extrémités desquels s'engagent deux écrous F, F. Un plateau G, destiné à recevoir des poids, est suspendu à l'extrémité C du levier BC. Des arrêts H, K, sont disposés de manière à s'opposer à ce que le levier, en tournant autour de l'arbre, soit dans un sens, soit dans l'autre, s'écarte trop de la position horizontale où il doit être maintenu.

Supposons que l'arbre A soit mis en mouvement par la machine

motrice dont on veut évaluer la puissance, et qu'on serre les écrous F, F, de manière à appliquer fortement sur sa surface le morceau de bois D, et ceux que porte la chaîne EE. L'adhérence qui se développe entre l'arbre et ces espèces de mâchoires du frein tendra à entraîner le levier BC dans le mouvement de rotation de l'arbre ; mais l'arrêt H s'y oppose, et en obligeant le levier BC à rester immobile, il détermine le glissement de l'arbre entre les mâchoires du frein. Le frottement qui résulte de ce glissement est une résistance appliquée à l'arbre, et qui tend à détruire son mouvement. On conçoit qu'on puisse arriver par le tâtonnement à serrer les écrous F, F, de telle manière que la machine prenne le même mouvement que lorsqu'elle fonctionne dans les circonstances ordinaires ; alors le travail résistant, développé par le frottement du frein sur l'arbre, peut être pris pour la mesure de la quantité de travail que la machine est capable d'effectuer. Reste donc à évaluer ce travail.

Pour y arriver, on met des poids dans le plateau G, en quantité suffisante pour que le levier BC se maintienne horizontal, sans toucher ni l'arrêt H ni l'arrêt K. Dès lors ce levier se trouve en équilibre, sous l'action de ce poids et des forces de frottement que l'arbre exerce aux divers points où il touche les mâchoires du frein. Admettons, pour simplifier le raisonnement, que le poids du frein tout entier, y compris le plateau G, soit négligeable, et nommons P le poids total placé dans ce plateau : admettons en outre qu'au lieu de plusieurs forces de frottement appliquées au frein, il n'y en ait qu'une seule Q, qui agira nécessairement suivant une tangente à la circonférence de l'arbre. Le frein ne pouvant que tourner autour de cet arbre, il faut, pour qu'il soit en équilibre, que les forces P et Q soient inversement proportionnelles à leurs distances respectives à son axe, ou, ce qui revient au même, inversement proportionnelles aux circonférences de cercle dont ces distances sont les rayons. Le produit de la force de frottement Q par la circonférence de l'arbre sera donc égal au produit de la force P par la circonférence dont le rayon serait la distance de l'axe de l'arbre à la verticale passant par le point C, où est suspendu le plateau G. Mais le premier produit n'est autre chose que le travail développé par la force de frottement Q, pendant un tour entier de l'arbre : le second produit, qui peut être facilement évalué, pourra donc servir de mesure au même travail. Il suffira de multiplier ce second produit par le nombre de tours que l'arbre fait en une heure, pour avoir la quantité totale de travail que la machine peut effectuer dans cet intervalle de temps.

Il est clair que le résultat auquel nous venons d'arriver sera encore le même, si, au lieu d'une seule force de frottement Q appliquée au frein, il en existe plusieurs appliquées en ses divers points de contact avec la surface de l'arbre. Quant au poids du frein et du plateau G, on en tiendra compte aisément, en mesurant, à l'aide d'un dynamomètre, la force qu'il faut appliquer au point C, verticalement et de bas en haut, pour soutenir le frein, lorsque les écrous F, F, ne sont pas serrés, et que le plateau ne contient aucun poids; on ajoutera cette force au poids placé dans le plateau, avant d'effectuer les calculs indiqués plus haut.

Ainsi, en résumé, lorsque le frein aura été disposé sur l'arbre, qu'on aura serré convenablement les écrous F, F, et chargé en conséquence le plateau G, de manière que la machine marche comme à l'ordinaire, et que le levier BC se maintienne horizontal, on trouvera de la manière suivante le travail total effectué par la machine en une heure. On comptera les poids mis dans le plateau, et l'on y ajoutera ce qui est nécsesaire pour tenir compte du poids du frein et du plateau; on multipliera ensuite le poids total ainsi obtenu, par la longueur de la circonférence du cercle qui aurait pour rayon la distance horizontale de l'axe de l'arbre à la verticale passant par le point de suspension du plateau; enfin on multipliera ce premier résultat par le nombre de tours que l'arbre fait en une heure. On aura soin d'évaluer en kilogrammes le poids mis dans le plateau, ainsi que ce qu'on doit lui ajouter; et en mètres la longueur de la circonférence qui doit servir à faire la première multiplication. Le résultat du calcul représentera le travail de la machine en une heure, évalué en kilogrammètres (§ 79).

§ 201. **Cheval-vapeur.** — Pour indiquer la puissance d'une machine motrice, on dit souvent que cette machine est de la force de 2 chevaux, de 3 chevaux, de 4 chevaux... Voici la signification précise de cette expression. On dit qu'une machine a la force d'un cheval, lorsqu'elle est capable d'élever 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur, en une seconde de temps. Sa force sera de 2 chevaux, de 3 chevaux, de 4 chevaux..., si elle est capable d'effectuer, dans le même temps, une quantité de travail double, triple, quadruple...; c'est-à-dire si elle peut élever en une seconde de temps, à 1 mètre de hauteur, 2 fois, 3 fois, 4 fois... 75 kilogrammes.

Il est facile, d'après cela, de calculer la force d'une machine motrice, exprimée en chevaux, quand on a trouvé, à l'aide du frein dynamométrique, la mesure du travail qu'elle effectue en une heure. Supposons, par exemple, que ce travail soit de

1 620 000 kilogrammètres. En une minute la machine produira 60 fois moins, c'est-à-dire 27 000 kilogrammètres; en une seconde, elle produira encore 60 fois moins, c'est-à-dire 450 kilogrammètres. Cette machine est donc capable d'élever 450 kilogrammes à 1 mètre de hauteur en 1 seconde de temps; et comme 450 est égal à 6 fois 75, on dira que la machine a une force de 6 chevaux.

La quantité de travail qu'un cheval peut effectuer, dans les circonstances ordinaires, est loin d'être aussi grande que celle que nous venons d'indiquer comme correspondant à ce qu'on appelle la force d'un cheval. La représentation de la force d'une machine par un certain nombre de chevaux, est donc de pure convention, et ne fait nullement connaître le nombre de chevaux qu'il faudrait employer pour effectuer le même travail que la machine. Aussi, pour éviter la confusion, emploie-t-on souvent la dénomination de *cheval-vapeur*, pour exprimer la force d'une machine; au lieu de dire qu'elle a la force de 6 chevaux, on dira qu'elle a la force de 6 chevaux-vapeur. Le mot *vapeur* qu'on ajoute ici au mot *cheval*, pour en préciser la signification, vient de ce que cette manière d'évaluer la force d'une machine motrice a été d'abord employée pour les machines à vapeur. Quelquefois aussi on remplace l'expression de cheval-vapeur par celle de *cheval dynamique*, qui a la même signification.

§ 202. **Moteurs animés.**—Nous ne pouvons pas donner maintenant des notions suffisantes sur le mode d'action des divers moteurs dont nous avons parlé. Nous nous contenterons donc de nous occuper des moteurs animés, et, à mesure que l'occasion s'en présentera, nous comblerons la lacune que nous allons laisser, relativement aux autres moteurs.

La force de l'homme peut être employée de bien des manières différentes. Il peut pousser ou tirer, soit horizontalement, soit verticalement, en agissant avec ses mains, et sans se déplacer; étant assis, il peut pousser avec ses pieds; il peut encore agir en poussant ou tirant, en même temps qu'il marche; il peut enfin agir par son poids seulement, comme dans les roues à chevilles (§ 56). La quantité de travail qu'il développe dans ces diverses circonstances est loin d'être la même. Il est donc important de savoir de quelle manière sa force doit être employée, pour produire la plus grande quantité possible de travail. Mais, en cherchant à résoudre cette question, on ne doit pas oublier que l'homme se fatigue en travaillant; si l'on veut lui faire produire une trop grande quantité de travail dans un temps donné, il ne pourra pas travailler aussi longtemps dans sa journée; si l'on

exige trop de lui dans une journée, il en résultera une fatigue qui persistera dans les journées suivantes, et c'est ce qu'on doit toujours éviter.

En ne considérant que la grandeur de la force qu'un homme peut développer pour vaincre une résistance, on reconnaît que cette force varie beaucoup, suivant que l'homme agit de telle ou telle manière. On a trouvé que le plus grand effort qu'il puisse produire correspond au cas où il cherche à soulever un poids placé entre ses jambes. Cet effort maximum peut aller à 200, et même 300 kilogrammes, suivant les individus : en moyenne, on peut l'évaluer à 130 kilogrammes.

Mais la force développée par l'homme n'est qu'un des éléments du travail qu'il peut effectuer; pour arriver à des notions exactes sur la grandeur de ce travail, il est nécessaire de tenir compte du chemin que l'homme peut faire parcourir au point d'application de l'effort qu'il exerce. S'il a une très-grande résistance à vaincre, il se fatiguera beaucoup en très-peu de temps, et ne pourra déplacer le point d'application de cette résistance que d'une petite quantité; si la résistance à vaincre est très-faible, il pourra faire parcourir un chemin beaucoup plus grand à son point d'application. Dans le premier de ces deux cas, aussi bien que dans le second, un des éléments du travail effectué pendant une journée aura une petite valeur, et par suite le travail lui-même sera petit. Si, au contraire, la résistance à vaincre n'est ni trop grande ni trop petite, l'homme pourra, dans une journée, déplacer son point d'application d'une quantité notable, et il en résultera une plus grande somme de travail. Un homme ne doit donc pas employer toute sa force, lorsqu'il se livre à un travail continu; il ne doit avoir à exercer à chaque instant qu'une portion de l'effort maximum dont il est capable.

C'est à l'expérience à indiquer la grandeur de la force qu'un homme doit développer, et la vitesse avec laquelle son point d'application doit se déplacer, pour effectuer le plus de travail possible dans une journée, suivant que cette force est appliquée de telle ou telle manière. C'est ainsi qu'on a trouvé que les hommes qui manœuvrent une sonnette à tiraude (§ 159), doivent soulever chacun environ 20 kilogrammes du poids du mouton, à 1 mètre de hauteur; qu'ils doivent battre à peu près 20 coups par minute, et 60 à 80 coups de suite : après quoi ils doivent se reposer autant de temps qu'ils ont travaillé. De même on a reconnu que les hommes qui manœuvrent un cabestan doivent exercer chacun une pression de 12 kilogrammes, à l'extrémité du levier sur lequel il agit; ils doivent, en outre, marcher avec

une vitesse de 0m,6 par seconde. De même encore on a trouvé qu'un homme qui tourne une manivelle, dont le rayon est d'environ 0m,32, doit exercer sur la poignée une pression de 7 à 8 kilogrammes, et faire faire à la manivelle de 20 à 25 tours par minute. Pour arriver à ce dernier résultat, on emploie une manivelle dynamométrique, dont la poignée A (fig. 276), est fixée à l'extrémité d'une lame de ressort BC. On adapte la manivelle à

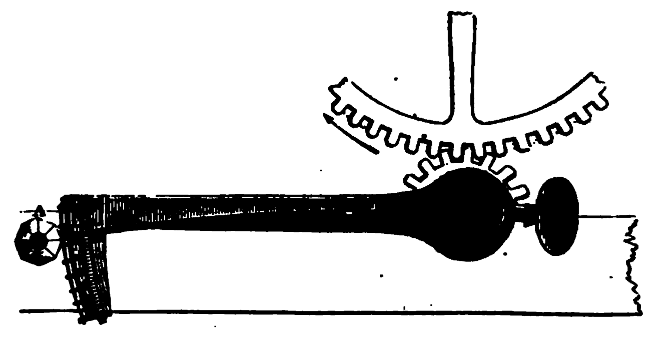


Fig. 276.

l'extrémité de l'arbre qu'on veut faire tourner, et on l'y assujettit à l'aide d'une vis de pression qu'on voit sur la figure. Lorsque ensuite on produit le mouvement de rotation, en agissant sur cette manivelle, le ressort fléchit, et la quantité dont il se déforme indique la grandeur de la pression appliquée à la poignée. Un arc de cercle, gradué d'avance, tourne avec la manivelle sans participer à la flexion du ressort; et il suffit de voir à quel point de division correspond un index que porte le ressort, pour connaître le nombre de kilogrammes qui représente cette pression.

En général, on peut dire qu'un homme effectue une plus grande quantité de travail dans sa journée, lorsqu'il se repose de temps en temps, que lorsqu'il agit d'une manière continue. D'un autre côté, cette quantité de travail est d'autant plus grande, que les efforts exercés par ses muscles se rapprochent plus de ceux auxquels ils sont destinés par leur nature. Considérons, par exemple, un homme qui emploie sa journée à monter et à descendre successivement une rampe ou un escalier, sans aucune charge. La simple élévation de son corps, pendant qu'il montera, donnera lieu à une certaine quantité de travail, qu'on évaluera en multipliant son poids par la hauteur totale dont il l'aura élevé

rticale; cette quantité de travail sera plus grande
'il aurait ef-
s la même
nontant avec
t descendant
ation de son
ujours com-
valuation du
voit, en effet,
'un homme
une charge,
e ses jambes,
tinés seule-
pporter son
ouvent plus
s ne doivent
ellement, et
une fatigue
une diminu-
du travail
ces muscles.
nu que c'est
t descendant
vement, sans
long d'une
un escalier,
ne peut dé-
plus grande
travail. En
de cette ma-
vaillant cha-
8 heures, il
sa journée
e 280 000km.
mme, agis-
nanivelle, ne
ns le même
72 000km; et
loyé à élever
une sonnette
ne produirait
le 100 000km.

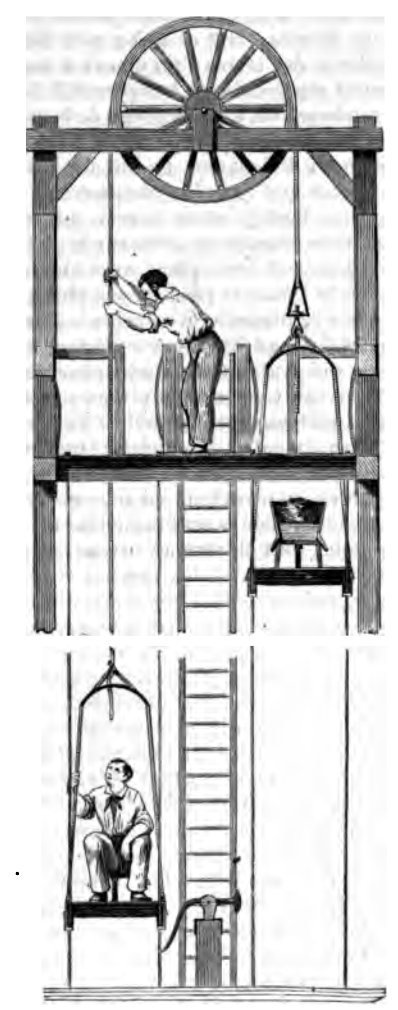


Fig. 277.

ès-avantageux *de faire consister* le travail de l'homme

dans la simple élévation de son corps, toutes les fois que cette élévation peut être employée à la production de l'effet qu'on veut obtenir. C'est ce qu'on peut faire, par exemple, lorsqu'on a à élever des terres d'un niveau à un autre, en se servant de l'appareil représenté par la figure 277. Cet appareil se compose d'une grande poulie, dans la gorge de laquelle passe une corde qui supporte à chacune de ses extrémités un grand plateau analogue aux plateaux de balance. La longueur de corde a été déterminée de manière que l'un des plateaux soit au niveau du sol inférieur, lorsque l'autre est au niveau du sol supérieur. On amène une brouette chargée de terre sur le plateau qui est en bas; en même temps un ouvrier se place, avec une brouette vide, dans l'autre plateau. Si l'ouvrier pèse un peu plus que la terre contenue dans la première brouette, il entraîne la corde; le plateau sur lequel il est placé descend du niveau supérieur au niveau inférieur; et le plateau qui contient la brouette chargée de terre s'élève au contraire du niveau inférieur au niveau supérieur. Alors on décharge les deux plateaux, pour remettre une brouette chargée de terre dans celui qui vient de descendre, et une brouette vide, avec un ouvrier, dans celui qui vient de monter; les plateaux se mettent de nouveau en mouvement en sens contraire, et ainsi de suite. Les brouettes pleines sont amenées au bas de l'appareil; à mesure qu'elles sont élevées au niveau supérieur, on les emmène pour les vider; puis on les ramène vides vers le haut de l'appareil; elles redescendent, et retournent à l'endroit où elles doivent être remplies pour recommencer le même mouvement. Des ouvriers sont employés, les uns au niveau inférieur, les autres au niveau supérieur pour rouler les brouettes pleines ou vides; en même temps d'autres ouvriers sont uniquement occupés à monter du niveau inférieur au niveau supérieur, à l'aide d'une échelle placée entre les deux plateaux, et à descendre successivement, un à un, avec une brouette vide, dans l'un ou l'autre de ces deux plateaux. Un homme, placé au haut de l'appareil, agit sur la corde pour ralentir ou accélérer le mouvement, suivant que le poids du plateau descendant l'emporte plus ou moins sur le poids du plateau ascendant. Cet appareil a été employé pour la première fois dans les travaux de terrassements effectués au fort de Vincennes, près Paris, et y a procuré une économie considérable.

Lorsqu'un homme agit sur une roue à chevilles (§ 56), le travail qu'il effectue consiste uniquement dans l'élévation de son corps, qui redescend aussitôt en faisant tourner la roue; il se trouve dans des conditions analogues à celles d'un homme qui monte une échelle, pour employer ensuite son poids à la pro-

duction d'un effet utile. Aussi la quantité de travail qu'il effectue, dans une journée de 8 heures, va-t-elle jusqu'à 256 000^{km}. On voit par là que les roues à chevilles sont d'excellentes machines pour utiliser la force de l'homme. Le mouvement de rotation qu'elles reçoivent de l'action d'un ou de plusieurs hommes peut d'ailleurs être employé à tout autre usage qu'à extraire les pierres des carrières.

§ 203. Le cheval est très-souvent employé comme moteur. Mais il offre beaucoup moins de variété que l'homme, dans la manière dont sa force peut être appliquée. Son mode d'action se réduit presque uniquement à tirer horizontalement, dans le sens dans lequel il marche. On peut d'ailleurs appliquer au travail du cheval les mêmes observations générales qu'au travail de l'homme.

L'effort maximum qu'un cheval peut exercer en tirant, s'élève moyennement à 400^{k} ; mais lorsqu'il travaille d'une manière continue, il doit tirer beaucoup moins. Un bon cheval de roulier, qui travaille 6 jours par semaine, et qui fait environ 28 kilomètres par jour, avec une vitesse de 3 kilomètres par heure, exer force de traction d'environ 50 kilogrammes : le travail qu veloppe ainsi dans une journée s'élève à 1 400 000^{km}.

Lorsqu'on veut employer la force du cheval à autre chose qu'au tirage d'une voiture, on le fait habituellement agir dans un *manége*. Dans ce cas il est attelé à une pièce de bois fixée à un arbre vertical ; il tire en tournant, et fait prendre à cet arbre un mouvement de rotation, qui peut ensuite se transmettre à toute espèce de machine (fig. 278). On peut dire que le manége est pour

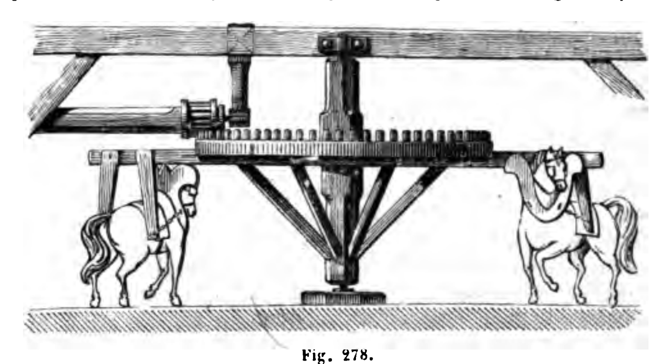


Fig. 278.

le cheval ce que la manivelle est pour l'homme. Un cheval qui travaille dans un manége produit moins d'effet qu'un cheval de

roulier, et se fatigue davantage ; pour qu'il ne soit pas trop gêné, il faut que le manége ait au moins 13 mètres de diamètre. En comparant la quantité de travail qu'un cheval effectue dans un manége, avec celle qui est effectuée par un homme agissant sur une manivelle, on trouve qu'un cheval équivaut à peu près à 7 hommes.

Le travail effectué, en une seconde de temps, par un cheval attelé à un manége, ne dépasse pas 42^{km}. On voit donc que nous avons eu raison de dire (§ 201) que la force d'un cheval est inférieure à ce que l'on nomme un cheval-vapeur ou un cheval dynamique, puisqu'on entend par là une puissance capable de produire un travail de 75^{km} par seconde.

Un bœuf, attelé à une voiture, peut exercer une force de traction presque égale à celle qu'exerce un cheval ; mais il produit moitié moins de travail, à cause de sa lenteur naturelle. Attelé à un manége, un bœuf effectue presque autant de travail qu'un cheval.

Un âne agissant sur un manége ne produit guère plus du quart du travail effectué par un cheval.

§ 204. **Mouvement perpétuel.** — C'est ici le lieu d'entrer dans quelques détails sur la fameuse question du *mouvement perpétuel*, dont tant de personnes se sont occupées, et s'occupent encore maintenant. Mais avant tout il est indispensable de savoir au juste ce qu'on entend sous le nom de mouvement perpétuel.

La plupart des personnes qui n'ont pas étudié la question, croient naturellement que la recherche du mouvement perpétuel consiste dans la recherche d'un corps qui soit perpétuellement en mouvement. Aussi, quand on affirme que la découverte du mouvement perpétuel est impossible, trouve-t-on d'assez nombreux incrédules, et il y en a qui prétendent prouver que cette affirmation n'est pas exacte, en donnant pour exemple la terre, dont le mouvement autour du soleil présente pour eux tous les caractères du mouvement perpétuel. Mais ceux qui connaissent la question, ceux surtout qui ont fait leurs efforts pour en trouver la solution, donnent une tout autre signification au mouvement perpétuel.

Nous avons dit que pour vaincre les résistances appliquées à une machine, et entretenir par là son mouvement, il fallait lui appliquer une puissance ; nous avons ajouté que cette puissance est habituellement empruntée aux moteurs animés, ou à une chute d'eau, ou au vent, ou à la vapeur. Quand on cherche le mouvement perpétuel, on se propose de trouver une machine qui puisse fonctionner sans avoir recours à aucun de ces agents, ni à aucun autre du même genre ; on cherche une machine mo-

trice qui puisse produire du travail utile, sans être soumise à l'action d'un moteur : on veut, en un mot, construire une machine qui soit elle-même un moteur.

On comprend dès lors tout l'intérêt que présente cette question à ceux qui croient que la solution en est possible, et qui passent leur temps à chercher cette solution. Les machines qui rendent tant de services à l'homme, ont toujours besoin d'un moteur. Pendant longtemps les hommes, les animaux, l'eau et le vent étaient les seuls moteurs employés. Mais, d'une part, l'emploi des hommes et des animaux entraîne une dépense continuelle. D'une autre part, l'eau et le vent ne peuvent être employés que dans des positions particulières ; les chutes d'eau sont limitées, et l'on ne peut pas en créer à volonté de nouvelles ; le vent est une source de mouvement plus répandue, mais il présente trop d'irrégularité dans son action. La découverte des machines à vapeur a rendu un service immense, en ce qu'elle a donné le moyen d'établir partout un moteur aussi puissant qu'on veut : l'emploi d'une machine à vapeur nécessite bien une dépense continuelle, comme l'emploi des moteurs animés ; mais cette dépense, résultant de la consommation du combustible, est bien inférieure à celle qu'occasionneraient des hommes ou des animaux en assez grand nombre pour produire le même effet. Quand on cherche le mouvement perpétuel, on veut aller plus loin, on veut trouver une machine qui puisse atteindre le même but que la machine à vapeur, mais qui ne nécessite aucune autre dépense habituelle que celle de son entretien. Il est bien clair que celui qui ferait une pareille découverte y trouverait immédiatement une source de richesse ; ce serait pour lui l'équivalent de la pierre philosophale, et c'est ce qui explique pourquoi tant de personnes s'y sont appliquées et s'y appliquent encore. On peut même dire que la découverte du mouvement perpétuel serait infiniment préférable à celle de la pierre philosophale. Celui qui trouverait le moyen de faire de l'or s'enrichirait, il est vrai : mais il n'en résulterait pas un avantage bien marqué pour la société en général. L'or n'est pas recherché pour lui-même, mais pour la valeur de convention qui lui est attribuée, et cette valeur diminuerait aussitôt qu'on pourrait en fabriquer autant qu'on voudrait. La découverte du mouvement perpétuel, au contraire, permettrait de donner un plus grand essor à l'industrie, et aurait pour conséquence la fabrication à de plus légers frais d'une foule d'objets qui concourent au bien-être des hommes. L'auteur d'une pareille découverte serait véritablement le bienfaiteur de l'humanité.

Mais malheureusement cette découverte est impossible. Et il ne

faut pas croire que nous voulons dire, par là, que les moyens dont nous pouvons disposer soient impuissants pour nous y conduire. La découverte du mouvement perpétuel n'est pas seulement impossible à l'homme; elle est d'une impossibilité absolue. La vérité de cette proposition est établie rigoureusement, tout aussi bien que celle des théorèmes de géométrie. C'est ce qui résulte des principes exposés précédemment. Nous avons vu, en effet, que le travail moteur développé pendant toute la durée de la marche d'une machine n'est jamais inférieur au travail résistant total qui s'est produit pendant le même intervalle de temps. Le premier travail est habituellement égal au dernier; il lui est supérieur, lorsqu'il s'est produit des chocs qui ont détruit une portion du travail moteur. Une machine ne peut donc produire aucun travail utile, si elle n'est soumise à l'action d'une puissance qui développe une quantité de travail moteur égale au travail utile qui doit être effectué, augmenté du travail dû aux résistances passives qui accompagnent toujours la production du travail utile. Une machine ne sert qu'à transmettre l'action du moteur pour vaincre des résistances; mais, dans cette transmission, elle n'augmente pas la quantité totale de travail effectuée par ce moteur : elle la diminue plutôt, puisque les résistances passives que son mouvement développe en absorbent une portion.

§ 205. Si l'on examine les diverses tentatives qui ont été faites pour arriver à la découverte qui nous occupe, on verra qu'on cherche généralement à produire le mouvement à l'aide d'un corps qui tombe d'une certaine hauteur; ce corps doit être ensuite relevé par la machine même, à la hauteur dont il est tombé, en même temps qu'elle effectuera du travail utile, en raison du mouvement qu'elle aura reçu. En supposant qu'on ait pu disposer la machine de manière à obtenir ce résultat, on voit que le même corps pesant, en tombant et remontant ainsi successivement, entretiendrait le mouvement aussi longtemps qu'on voudrait, et donnerait lieu à la production d'une quantité indéfinie de travail utile.

Ici ce sera une roue hydraulique mise en mouvement par l'eau qu'on a placée dans un réservoir supérieur; la roue est employée à faire mouvoir des pompes, qui remontent dans le réservoir toute l'eau qui a agi sur la roue, et qui élèvent en outre une certaine quantité d'eau excédante, qui peut être utilisée.

Ailleurs ce sera une roue, taillée comme les roues à rochet des horloges, et portant des tiges égales articulées dans les divers angles formés par les dents (fig. 279); ces tiges se terminent par des boules de même poids. Si l'on fait tourner la roue dans le sens de la flèche, chaque tige prend successivement des positions

différentes dans l'angle au fond duquel elle est articulée, en raison de l'action de la pesanteur qui tend toujours à mettre son centre de gravité le plus bas possible. D'après les idées de l'auteur de cette roue, le mouvement doit s'entretenir de lui-même, et vaincre en même temps une résistance appliquée à la machine, parce que les boules qui descendent sont plus éloignées que les autres de la verticale passant par l'axe de la roue, et que par suite elles agissent sur un plus grand bras de levier.

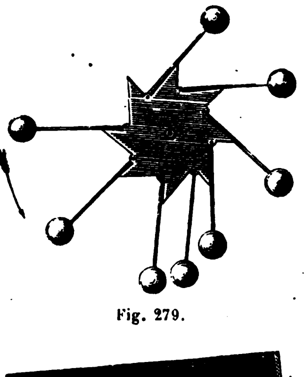


Fig. 279.

Fig. 280.

Une autre fois ce sera une caisse A (fig. 280) pouvant tourner autour d'un axe B, et contenant du mercure C ; deux pièces fixes D, E, servent à arrêter la caisse dans son mouvement de rotation, en sorte qu'elle peut osciller, en venant s'appuyer alternativement sur l'une ou sur l'autre de ces deux pièces. Dès que la caisse penche d'un côté, le mercure coule et tend à incliner de plus en plus, jusqu'à ce qu'elle vienne buter contre l'un des deux arrêts ; le mouvement que prend ainsi la caisse se transmet, à l'aide d'engrenages, à un volant qui prend un mouvement de plus eu plus rapide : ce volant agit alors sur un levier qui remonte le mercure, en replaçant la caisse dans une position horizontale, et l'inclinant même un peu en sens contraire ; le mercure coule de l'autre côté, et le nouveau mouvement qu'il donne ainsi à la caisse entretient le mouvement du volant, qui le relève encore, et ainsi de suite. Le mouvement de bascule que la caisse prend alternativement, dans un sens et dans l'autre, donne lieu à un mouvement continu du volant, qui doit pouvoir effectuer du travail utile.

Il n'est pas nécessaire d'ajouter qu'aucun des essais qui ont été faits d'après ces idées n'a réussi. Un corps qui tombe d'une certaine hauteur ne peut pas déterminer un mouvement capable de le remonter à son point de départ, et de produire en même temps un effet utile. S'il en était ainsi, le travail résistant serait plus grand que le travail moteur, puisqu'une portion seulement du travail résistant, celle qui correspond à l'élévation du corps qui est tombé, est déjà égale au travail moteur total. La machine ne

serait-elle employée à produire aucun effet utile, qu'elle ne pourrait pas encore marcher ; puisque, si elle marchait, le travail résistant surpasserait encore le travail moteur de tout le travail correspondant aux résistances passives, travail qu'on peut bien atténuer, mais qu'on ne peut pas détruire complétement. Dans le premier des trois exemples qui viennent d'être cités, la roue hydraulique ne peut marcher qu'autant que les pompes sont disposées de manière à élever, dans le réservoir, une portion seulement de l'éau qui fait tourner la roue. Dans le second exemple, les boules qui descendraient, si le mouvement se produisait dans le sens de la flèche, agissent bien à l'extrémité d'un plus grand bras de levier que les autres pour entretenir le mouvement, mais celles qui sont placées de l'autre côté sont plus nombreuses. Tantôt les premières l'emportent sur les dernières, tantôt au contraire les dernières l'emportent sur les premières; et cela établit une compensation, qui n'a pas lieu à chaque instant, mais qui a lieu en moyenne pendant un tour entier de la roue. Dans le troisième exemple, la caisse, en s'inclinant d'un côté, produit un mouvement qui peut bien la relever, mais pas assez pour qu'elle commence à s'incliner de l'autre côté, et que la chute du mercure continue le mouvement.

Toutes ces tentatives sont fondées, ainsi que nous l'avons déjà dit, sur des notions d'équilibre, surtout celles de l'équilibre du levier, notions qui n'ont pas été complétées par l'étude des machines à l'état de mouvement. Si l'on se pénétrait bien du principe d'après lequel *ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse* (§ 70), on ne s'userait pas en vains efforts pour arriver à la découverte du mouvement perpétuel.

DEUXIÈME PARTIE.

MÉCANIQUE DES FLUIDES.

§ 206. Les principes généraux de la mécanique, que nous avons étudiés dans la première partie de cet ouvrage, s'appliquent à toute espèce de corps. Mais, quand on considère spécialement les liquides et les gaz, on reconnaît qu'il doit exister pour eux des principes particuliers, dépendant de leur constitution propre. Cette seconde partie a pour objet l'exposition de ces principes; elle comprendra, en même temps, leur application à l'étude des machines et des divers phénomènes mécaniques où les liquides et les gaz jouent un rôle important.

PRINCIPES RELATIFS A L'ÉQUILIBRE DES FLUIDES.

§ 207. **Transmission des pressions dans un liquide.** — Tous les corps que nous voyons autour de nous sont pesants, c'est-à-dire qu'ils sont soumis à l'action de la pesanteur. Mais cette propriété n'est pas inhérente à leur nature; elle est due à l'attraction qu'ils éprouvent de la part de la terre, dans le voisinage de laquelle ils se trouvent placés. Si chacun d'eux était porté dans un lieu de l'espace extrêmement éloigné de la terre, et de tous les corps célestes, qui sont capables d'exercer une attraction analogue, ils cesseraient d'être pesants. Nous sommes donc en droit de supposer que certains corps ne sont pas pesants, sans pour cela rien changer à leur nature; c'est ce que nous allons faire pour les liquides dont nous allons nous occuper, afin d'étudier plus facilement la transmission des pressions par leur intermédiaire.



Fig. 281.

Soit AB (fig. 281), un tuyau d'une forme quelconque, mais dont la section transversale est la même dans toute sa longueur. Concevons qu'on ait introduit dans ce tuyau un liquide non pesant, de l'eau par exemple; concevons, en outre, qu'on en ait

fermé les deux extrémités A et B à l'aide de deux disques, ou *pistons*, dont les contours s'adaptent exactement aux parois intérieures du tuyau. Si l'on vient à pousser le piston A, ce piston poussera le liquide, qui poussera à son tour le piston B, et tendra à le faire sortir du tuyau. Pour maintenir le piston B dans la position qu'on lui avait donnée, on sera obligé de lui appliquer une force résistante qui s'oppose à l'action de la force qui est appliquée au piston A. Or, on admettra sans peine que cette force résistante, appliquée au piston B, doit être égale à la force appliquée au piston A, pour qu'elle puisse lui faire équilibre.

§ 208. Prenons maintenant un vase fermé, d'une forme quelconque (fig. 282), et complétement rempli d'un liquide non pesant. Imaginons que l'on pratique deux ouvertures A, B, de mêmes dimensions, dans la paroi de ce vase; qu'on adapte deux bouts de tuyau à ces ouvertures, et qu'on y introduise deux pistons dont les faces intérieures viennent s'appuyer sur le liquide, de manière à remplacer les portions de la paroi qui ont été enlevées. Si l'on vient à pousser le piston A, pour le faire entrer à l'intérieur du vase, le liquide tendra à sortir par l'ouverture B, en repoussant le piston qui la ferme. Pour empêcher le liquide de sortir, et maintenir le piston B dans la position qu'il a reçue, on devra lui appliquer une force résistante, capable de faire équilibre à la force qui tend à faire entrer le piston A à l'intérieur du vase. Il est facile de faire voir que cette force, appliquée au piston B, doit encore être égale à celle qui est appliquée au piston A, comme dans le cas précédent. Nous pouvons, en effet, regarder les deux bouts du tuyau adaptés aux ouvertures A et B, comme étant les extrémités d'un tuyau idéal ACB, dont la section transversale soit la même dans toute sa longueur. Lorsque le piston B a été soumis à une résistance capable de faire équilibre à la pression exercée sur le piston A, on peut supposer que la portion du liquide qui enveloppe le tuyau idéal ACB perde sa mobilité et devienne solide, sans que pour cela l'équilibre soit troublé. Dès lors il ne reste plus de liquide qu'à l'intérieur du tuyau ACB, qui se trouve avoir pour parois le liquide solidifié dont nous venons de parler; les deux pistons se retrouvent dans les mêmes conditions que ceux du § 207, et par conséquent les forces qui leur sont appliquées doivent être égales.

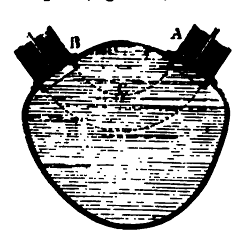


Fig. 282.

§ 209. Supposons maintenant qu'on ait pratiqué trois ouvertu-

(fig. 283), dans la paroi du même vase, rempli,
oment, d'un liquide non
eux de ces ouvertures A,
r exemple carrées, soient
ntre l'autre, de manière
commun. Si l'on ferme
r trois pistons, et qu'on
un d'eux une force qui
pénétrer à l'intérieur du
rces devront être égales,
uellement équilibre. Car,
ue les forces appliquées
se feront équilibre, on



Fig. 283.

cet équilibre en supposant que l'un d'eux soit
vase et en fasse partie intégrante ; et l'on sera
a cas où la paroi n'est percée que de deux ou-
ce qui entraîne l'égalité des forces appliquées
erment ces ouvertures.
pistons adjacents A et B, au lieu d'être indépen-
tre, peuvent être fixés l'un à l'autre, sans que
oublé, pourvu qu'ils restent soumis aux mêmes
insi un piston unique AB, dont la surface sera
du piston C. Les deux forces égales et paral-
t appliquées aux deux pistons A et B, se trouve-
au piston unique AB, et pourront par consé-
lacées par une seule force, double de chacune
a même direction. Ainsi on voit que la paroi
cée de deux ouvertures AB, C, dont l'une est
nde que l'autre, la force appliquée au piston qui
e ouverture doit être double de celle qui est ap-
qui ferme la seconde, pour qu'il y ait équilibre.
même que, si la paroi d'un vase, fermé de tou-
enant un liquide non pesant, était percée de
dont l'une soit trois fois, quatre fois, cinq fois
l'autre, et que ces ouvertures fussent fermées
umis à des forces, l'équilibre ne pourrait avoir
ue la force appliquée au premier piston serait
, quintuple de l'autre. Et, en général, on peut
es forces appliquées à deux pistons A, B (fig. 284),
ouvertures pratiquées dans la paroi d'un vase
nt un liquide non pesant, doivent être propor-
randeurs de ces ouvertures, pour qu'il y ait

§ 210. Lorsqu'une force est appliquée au piston A (fig. 284), de manière à le pousser vers l'intérieur du vase, ce piston presse le liquide; celui-ci presse à son tour le piston B, et tend à le repousser au dehors. C'est pour vaincre la pression que le piston B éprouve de la part du liquide, qu'on est obligé de lui appliquer une force résistante capable de le maintenir en équilibre. La force qu'on lui applique ainsi est donc égale à cette pression, et peut lui servir de mesure. Si le piston B était fixé à la paroi du vase, de manière à en faire partie, il n'aurait plus besoin d'être maintenu en équilibre par une force; mais il n'en éprouverait pas moins la même pression de la part du liquide. Et comme le piston B, ainsi fixé, se trouve dans les mêmes conditions que les autres portions de la paroi du vase, on peut dire que la force appliquée au piston A détermine des pressions du liquide sur toutes les parties de cette paroi; de plus, d'après ce qui précède, ces pressions sont proportionnelles aux grandeurs des portions de la paroi sur lesquelles elles s'exercent; c'est ce qui constitue le principe de la transmission des pressions dans un liquide.

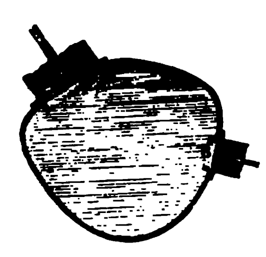


Fig. 284.

Supposons, par exemple, que le piston A ait une surface de 10 centimètres carrés, et que la force qui lui est appliquée soit de 50 kilogrammes. Par suite de l'action de cette force, le liquide pressera la paroi de toutes parts; la pression qu'elle supportera sur une étendue de 1 centimètre carré sera de 5 kilogrammes; sur une étendue de 2 centimètres carrés, la pression sera de 10 kilogrammes; sur une étendue de 3 centimètres carrés, elle sera de 15 kilogrammes, et ainsi de suite. On dira, dans ce cas, que la pression exercée par le liquide sur la paroi est de 5 kilogrammes par centimètre carré: cette pression de 5 kilogrammes est ce que l'on nomme la *pression rapportée à l'unité de surface*.

§ 211. **Pression aux divers points d'une masse liquide. — Égalité de pression dans tous les sens.** — Prenons un point quelconque A (fig. 285), à l'intérieur d'une masse liquide non pesante, contenue dans une enveloppe fermée. Nous pouvons imaginer qu'un petit plan *mn*, d'une direction quelconque, passe par ce point A. Si le liquide exerce une pression sur les diverses parties de la paroi qui le contient, pression qui pourra provenir par exemple de l'application d'une force au piston B, le petit plan *mn* éprouvera également une pression sur chacune

faces ainsi que nous allons le voir. Concevons pour
surface *pq*, de forme arbitraire, se relie avec le petit
'étende de toutes parts jusqu'à
'ase, de manière à diviser le
eux portions bien distinctes,
ibre du liquide ne sera pas
us supposons que la partie C
e, et cette hypothèse ne mo-
mment en rien les conditions
les se trouve la face du plan
n regard de la partie D. Mais
n appartiendra à l'enveloppe
era le liquide restant, et il
ı conséquence la même pres-
ıtes les autres parties de cette enveloppe, à égalité

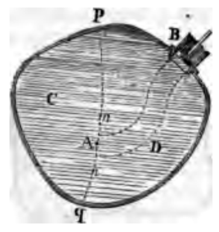


Fig. 285.

plication d'une force au piston B détermine, non-
ne pression du liquide sur chaque portion de la pa-
ui le contient, mais encore une pression sur chaque
an quelconque qu'on imagine mené par un point
ieur de la masse liquide ; et toutes ces pressions sont
pour une même étendue de surface pressée. Les
e supportent les deux faces du plan sont, bien en-
ées perpendiculairement à ce plan.

nçoit, par le même point A, successivement divers
ıe *mn* (fig. 285), tous ces plans éprouveront la même
l'unité de surface : puisque, d'après ce que nous
ɔir, cette pression ne dépend en aucune manière de
du plan. C'est ce qui constitue le principe de l'é-
ession dans tous les sens autour d'un point. La pres-
tée par l'unité de surface d'un quelconque de ces
ssent par le point A, est ce que l'on nomme la pres-
t A.

essions dans les liquides pesants.— Les résul-
nts ont été obtenus en supposant que les liquides
ssait n'étaient pas pesants. Nous allons revenir à la
ıe faisant plus abstraction de l'action de la pesan-
ı verrons en quoi les résultats auxquels nous sommes
ront modifiés.

ı vase fermé de toutes parts est rempli d'un liquide
iquide exerce des pressions sur les diverses portions
, soit que ces pressions soient occasionnées par l'ap-
une force à un *piston, comme* nous l'avons supposé


Fig. 286.

reconnaît que ces pressions so
égales entre elles, pour une m
due de surface, pourvu que cet
soit très-petite. Voici comment on peut s'en rendre co

Si l'on conçoit une surface fermée, de petites dimen
comprenne le point A à son intérieur (fig. 286), on p
mettre que tout le liquide situé en dehors de cette s
solidifié, sans que l'équilibre soit troublé, et sans que
très-voisin du point A cesse d'être dans les mêmes c
Mais alors on n'aura plus que la petite quantité de liq
tenue à l'intérieur de cette surface, et ce liquide exerc
elle des pressions en ses divers points. Ces pressions ser
inégales, puisque le liquide qui les produit est pesant
conçoit que, le poids de ce liquide tout entier étant
l'action de ce poids ne pourra introduire que de très-
férences entre les pressions que le liquide exerce
points de son enveloppe : et ces différences seront d'a
faibles qu'on aura donné de plus petites dimensions à
fermée qu'on a imaginée autour du point A. En supp
que les dimensions de cette petite surface fermée dim
définiment, les pressions qu'elle supportera sur ses div
de la part du liquide qu'elle contient, approcheront
plus d'être égales entre elles ; c'est-à-dire que ces pr
procheront de plus en plus d'être les mêmes que si le l

pression dans tous les sens, autour d'un point, est donc vrai pour les liquides pesants, aussi bien que pour les liquides non pesants.

Nous venons de dire que l'égalité des pressions exercées sur les divers plans qu'on peut imaginer par un même point A d'une masse liquide pesante, n'avait lieu qu'autant qu'on ne prenait que de très-petites surfaces sur tous ces plans, autour d'un point A. Généralement ces pressions ne seraient plus égales entre elles, si on les prenait sur l'unité de surface de chacun de ces plans, à moins que cette unité de surface ne fût extrêmement petite. Pour pouvoir arriver à la notion de ce qu'on nomme la pression au point A de la masse liquide, on conçoit que l'unité de surface de chacun des plans qu'on peut faire passer par ce point soit uniformément pressée dans toute son étendue, et cela de la même manière qu'elle l'est réellement dans le voisinage du point A : la pression totale que supporterait ainsi cette unité de surface ne varierait plus d'un plan à un autre, et c'est cette pression totale qui forme ce qu'on appelle la pression au point A.

§ 213. Examinons maintenant de quelle manière varie la pression d'un point à un autre, à l'intérieur d'une masse liquide pesante, en équilibre.

Prenons d'abord deux points A, B (fig. 287), qui soient situés sur un même plan horizontal. Nous pouvons imaginer, autour de ces deux points comme centres, deux petits cercles égaux, dont les plans soient dirigés perpendiculairement à la ligne droite AB qui joint les deux points; nous pouvons concevoir en outre que ces deux petits cercles forment les deux bases d'un cylindre, dont la ligne AB serait l'axe, et que tout le liquide qui est en dehors de ce cylindre soit solidifié. Nous n'aurons plus ainsi qu'à considérer le liquide contenu à l'intérieur du cylindre. Il est bien clair que les pressions exercées par ce liquide sur les deux bases A et B du cylindre sont égales entre elles, tout aussi bien que si ce liquide n'était pas pesant ; car les forces qui résultent de l'action de la pesanteur sur les diverses molécules du liquide, étant toutes verticales, ne tendent pas plus à le faire sortir par une des bases du cylindre que par l'autre. L'égalité des pressions exercées par le liquide, sur les deux petits cercles que nous avons imaginés autour des deux points A et B, avait donc lieu aussi avant qu'on eût solidifié le liquide situé en dehors du cylindre ; et, par conséquent, les pressions aux deux points A et B sont égales entre elles. On



Fig. 287.

voit par là que, *dans une masse liquide pesante en éq pression est la même pour tous les points situés sur un horizontal.*

§ 214. Considérons ensuite deux points A, B (fig. 288), une même verticale. Nous im encore, autour de ces deux poin centres, deux petits cercles égau dans des plans horizontaux; nous rons de même ces deux petit comme les bases d'un cylindre ay axe la ligne AB, et nous suppose tout le liquide qui est en deho cylindre soit solidifié. Dans cet éta ses, on voit que le liquide n'exerc

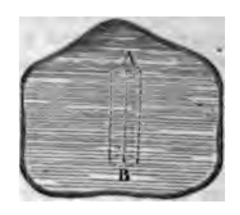


Fig. 288.

pressions égales sur les deux bases du cylindre. Si la périeure n'éprouvait aucune pression de la part du liq ne réagirait nullement sur lui, et la base inférieure n supporter que le poids du liquide. Si la base supérieure une pression de la part du liquide, elle réagit sur lui, en sant une pression égale ; cette pression se transmet, sans de grandeur, sur la base inférieure du cylindre ; et c inférieure a, en conséquence, à supporter la pression q ainsi transmise, et, en outre, le poids du liquide conte le cylindre. Donc, dans tous les cas, la pression que su base inférieure du cylindre est plus grande que la pres portée par sa base supérieure, d'une quantité égale au liquide qu'il contient.

Ce qui a lieu après qu'on a solidifié le liquide situé e du cylindre, avait également lieu avant cette solidificati dans un liquide pesant, la différence entre les pression tées par deux surfaces égales, placées en deux points qui une même verticale, est égale au poids du liquide que drait un cylindre ayant pour base une de ces deux surface hauteur la distance des deux points où elles sont placées. observe que ce que l'on nomme la pression en un poin quide, c'est la pression rapportée à l'unité de surface (§§2 on pourra énoncer la proposition suivante : *La pressi point d'une masse liquide pesante est égale à la pression en point situé verticalement au-dessus du premier, augmenté du liquide que contiendrait un cylindre ayant pour base surface, et pour hauteur la distance des deux points.*

§ 215. Soient enfin deux points A, B d'une masse li sante (fig. 289) qui ne sont situés, ni sur une même ver

sur un même plan horizontal. Pour comparer les pressions qui ont lieu en ces deux points, nous prendrons un troisième point C, situé à la rencontre de la verticale menée par le point A et du plan horizontal mené par le point B. Les pressions en B et C sont égales (§ 213). Mais la pression en C est plus grande que la pression en A d'une quantité égale au poids du liquide que renfermerait un cylindre ayant pour base l'unité de surface, et pour hauteur la ligne AC, qui n'est autre chose que la différence de niveau des deux points A et B.

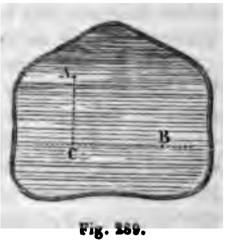


Fig. 289.

Donc, en définitive, on peut dire que : *La pression en un point d'un liquide pesant est égale à la pression en un autre point situé plus haut que le premier, augmentée du poids de la quantité de ce liquide que contiendrait un cylindre ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la différence de niveau de ces deux points.*

§ 216. Les pressions qu'un liquide pesant exerce en divers points de la paroi du vase qui le renferme se déduisent très-facilement de celles qui ont lieu aux divers points de la masse liquide. Nous avons trouvé que la pression est la même pour tous les points du liquide situés sur un plan horizontal : il en résulte qu'une petite portion de la paroi du vase, prise dans le voisinage d'un point A, (fig. 290) supporte la même pression qu'une surface d'égale étendue placée en un quelconque des points du plan horizontal qui passe par ce point A. La pression rapportée à l'unité de surface au point A, ou ce qu'on nomme simplement la pression au point A, sera donc la même que la pression qui a lieu en tout autre point du liquide pris au même niveau. On doit entendre ici par pression rapportée à l'unité de surface au point A, la pression que supporterait une surface plane d'une étendue égale à l'unité, placée au point A, dans la direction de la paroi du vase, et pressée dans toutes ses parties de la même manière que dans celles qui avoisinent le point A. Nous verrons également que la pression supportée par la paroi, au point B, est la même que celle qui a lieu en un quelconque des points du liquide, pris sur le plan horizontal qui passe par ce point B. Donc *la pression exercée par un liquide pesant, en un des points de la paroi du vase qui le contient, est égale à celle qu'il exerce en un autre point de cette paroi, situé plus haut que le premier, augmentée du poids d'un cylindre de*

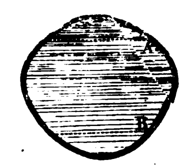


Fig. 290.

ce liquide, qui aurait pour base l'unité de surface, et pour hauteur la différence de niveau de ces deux points. Il est clair que si les deux points étaient situés à un même niveau, les pressions que le liquide exercerait en ces deux points seraient égales.

§ 217. Ce que nous venons de trouver permet d'évaluer la différence des pressions qu'un liquide exerce en deux points de la paroi du vase qui le renferme; mais cela ne conduit nullement à déterminer les pressions elles-mêmes, qui dépendent des circonstances dans lesquelles le liquide est placé. En le supposant toujours contenu dans un vase fermé de toutes parts, on peut concevoir qu'une portion de la paroi du vase soit remplacée par un piston mobile, auquel on appliquera une force, ainsi que nous l'avons déjà fait précédemment pour un liquide non pesant. Cette force, tendant à enfoncer le piston à l'intérieur du vase, presse le liquide; celui-ci presse à son tour les diverses parties de la paroi qui l'empêche de céder à l'action du piston. Mais ces pressions, transmises à la paroi par le liquide, ne sont plus les mêmes, à égalité de surface, comme cela avait lieu dans le cas d'un liquide non pesant : elles ont entre elles des différences qui résultent de l'action de la pesanteur sur le liquide, différences dont nous avons trouvé la grandeur.

Sauf cette modification, due au poids du liquide, la transmission des pressions s'effectue de même que dans les liquides non pesants, que nous avions considérés d'abord. On peut même quelquefois faire abstraction du poids du liquide, lorsque les pressions qui lui sont appliquées, et qu'il transmet aux parois, sont très grandes, et que les dimensions du vase, dans le sens vertical, sont assez petites. On n'altère ainsi les diverses pressions que de quantités qui sont insignifiantes, relativement à leurs grandeurs respectives.

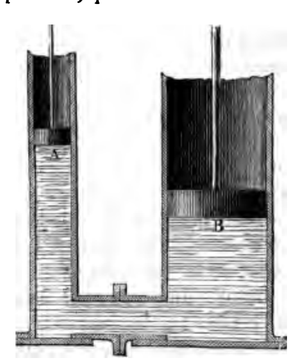


Fig. 291.

§ 218. C'est sur le principe de la transmission des pressions dans les liquides qu'est fondée la *presse hydraulique*, imaginée par Pascal. Soient deux cylindres creux A et B, (fig. 291), qui communiquent par leurs parties inférieures, et dans lesquels peuvent se mouvoir deux pistons. Supposons que les portions de ces cylindres, qui sont au-dessous des pistons,

soient remplies d'eau, ainsi que le tuyau qui les fait communiquer l'un à l'autre. Si l'on vient à exercer une pression sur le piston A, cette pression se transmettra au piston B, en s'accroissant dans le rapport des surfaces des deux pistons. Si, par exemple, la surface du piston A est 100 fois plus petite que celle du piston B, une pression de 5 kilog. appliquée au premier piston de haut en bas, fera supporter au second de bas en haut, une pression de 500 kilog. (nous négligeons ici le poids de l'eau). Cet appareil permet donc d'exercer une pression aussi grande qu'on voudra, avec une force donnée, puisqu'il suffit pour cela de prendre le piston B assez grand relativement au piston A. Il peut être assimilé au levier, à l'aide duquel on peut atteindre le même but.

Si le piston B cède à l'action de la pression qu'il supporte, et s'élève d'une certaine quantité, le piston A devra s'abaisser : mais ces deux pistons ne marcheront pas également. Le volume de l'eau devant rester le même, la quantité dont la capacité intérieure du vase diminue d'une part en A, doit être égale à celle dont elle augmente d'une autre part en B ; et comme ces quantités sont les volumes de deux cylindres ayant pour bases les surfaces des deux pistons, et pour hauteurs les chemins que ces pistons parcourent, il s'ensuit que ces chemins parcourus par les deux pistons sont inversement proportionnels à leurs surfaces. Donc si, d'une part, une pression de 5k, appliquée au piston A, détermine une pression de 500k appliquée au piston B, d'une autre part, le premier piston marchera 100 fois plus vite que le second ; donc enfin, comme pour le levier, *ce qu'on gagne en force, on le perd en vitesse.*

Nous nous contenterons ici de faire connaître le principe de la presse hydraulique, remettant à faire la description de cette machine, telle qu'elle est employée, après que nous aurons étudié les pompes.

§ 219. **Surface libre d'un liquide pesant.** — Dans ce qui précède, nous avons considéré la masse liquide pesante, qui faisait l'objet de nos recherches, comme remplissant complétement la capacité d'un vase fermé de toutes parts. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, soit que le volume du liquide soit plus petit que la capacité du vase fermé, soit que le vase soit ouvert dans sa partie supérieure, la surface de la masse liquide n'est pas en tous points en contact avec la paroi du vase. Le liquide, cédant à l'action de la pesanteur, se place au fond du vase, et il présente, dans sa partie supérieure, une surface libre dont nous allons nous occuper.

Si les molécules liquides ne sont soumises qu'à l'action de la pesanteur, outre celle des forces moléculaires qui existent toujours, et qu'aucune pression ne soit appliquée aux divers points

de la surface libre du liquide, cette surface libre s
horizontale. Pour nous en rendre compte, observons
que nous avons trouvé précédemment, relativeme
sions dans un liquide pesant en équilibre, est tout au
un liquide terminé par une surface libre, que dans
liquide qui remplit un vase fermé. Rien ne s'oppose
ce que nous imaginions que le vase dans lequel est
quide terminé par une surface libre, devienne un v
l'aide d'une paroi idéale qui s'étendrait sur toute
libre, en n'exerçant aucune pression en ses divers
dition de cette paroi ne modifierait en rien les pres
lieu à l'intérieur du liquide, ni celles qu'il exerce
rentes parties du vase qui le supportent. Supposons
surface libre d'un liquide pesant ne s
et horizontale, et nous verrons qu'il
ble que ce liquide soit en équilibre. P
cela, sur la surface libre, deux po
(fig. 292) qui ne soient pas à la même
nous menons, par ces deux points, de
AC, BD, et que nous les terminions en
C, D, situés sur un même plan ho
pressions en ces deux derniers poin
pas égales : car, les pressions en A et
les, celles qui auraient lieu en C et D seraient les po
cylindres de liquide, ayant pour base l'unité de surf
hauteurs, l'un AC, l'autre BD. Cette inégalité des p
et D, conséquence nécessaire de ce que les points A
pas à un même niveau, nous démontre que le liqu
pas être en équilibre avec une pareil
surface libre, puisque dans tout liqui
équilibre les pressions doivent être
pour tous les points situés sur un mê
rizontal (§ 213).

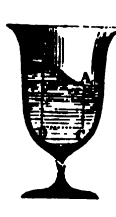


Fig. 292.

§ 220. On peut encore faire voir
manière que la surface libre d'un liq
molécules ne sont soumises qu'à l'acti
santeur, doit être plane et horizontal
le liquide soit en équilibre. Si cette
la forme indiquée par la figure 293, une molécule A
une partie inclinée de cette surface, se mettrait néc
en mouvement. Voyons en effet de quelle m
poids, qui est une force verticale dirigée suivant A
déplacer, en se combinant avec les actions qu'elle



Fig. 293.

des molécules voisines. Ces actions ne peuvent pro-
e de molécules très-rapprochées; la plus grande dis-
laquelle elles se font sentir est tellement petite, que l'on
arder la portion de la surface libre qui environne le
jusqu'à une pareille distance tout autour de ce point,
stant une portion de surface plane. Dès lors il est clair
forces moléculaires auxquelles la molécule A est
sont disposées symétriquement tout autour de la perpen-
AC à la surface libre, et qu'en conséquence la résul-
ces forces (§ 36) sera dirigée suivant cette perpendicu-
pposons maintenant que le poids de la molécule soit
sé en une force dirigée suivant AC, et une autre force
iculaire à AC, c'est-à-dire dirigée dans le plan tangent à
e au point A. La première de ces deux composantes
ien être détruite par la résultante des actions molécu-
ont la direction est la même; mais la seconde compo-
ra tout son effet, et fera glisser la molécule A sur la sur-
liquide. L'équilibre ne peut donc pas avoir lieu tant que
ce libre n'est pas plane et horizontale.

Pressions supportées par les parois. — Lorsqu'un
pesant, en équilibre, est terminé par une surface libre
divers points ne supportent aucune pression, il est facile
er la grandeur de la pression qui a lieu en chaque point
sse liquide, et aussi de celle que le liquide exerce sur cha-
tion de la paroi contre laquelle il s'appuie. Pour avoir la
au point A (fig. 294), on observera que la pression est
point B de la surface libre qui est situé
ment au-dessus du premier ; donc, d'a-
214, la pression au point A est égale au
n cylindre du liquide considéré, qui au-
base l'unité de surface, et pour hauteur
ce verticale AB du point A à la surface li-
iquide. De même, la pression exercée
la paroi du vase qui contient le liquide,
suivant la perpendiculaire CD à la por-
aroi qui avoisine le point C, est égale au
n cylindre du liquide, qui aurait pour
ité de surface, et pour hauteur la distance verticale CE
C à la surface libre du liquide.

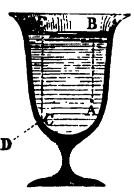


Fig. 294.

iquide dont on s'occupe est de l'eau, il suffira de se rap-
le 1 centimètre cube d'eau pèse 1 gramme (1), pour pou-

(1) ...que 1 *centimètre cube d'eau pèse 1* gramme, il faut que l'eau soit pure, et

voir évaluer facilement en nombres les pressions exercées par ce liquide. Prenons, par exemple, le centimètre carré pour unité de surface, et nous trouverons que la pression au point A (fig. 294), est d'autant de grammes qu'il y a de centimètres dans la hauteur AB ; de même, la pression que le liquide exerce en C, sur la paroi du vase, est d'autant de grammes qu'il y a de centimètres dans la hauteur CE. Si l'on prenait le décimètre carré, ou le mètre carré, pour unité de surface, ces pressions seraient d'autant de kilogrammes, ou d'autant de fois 1 000 kilogrammes, que les hauteurs AB, CE, contiendraient de décimètres, ou de mètres.

Dans le cas où le liquide considéré ne sera pas de l'eau, on ne pourra déterminer les pressions qu'il exerce, qu'autant qu'on connaîtra le rapport qui existe entre le poids d'un certain volume de ce liquide et le poids d'un égal volume d'eau, c'est-à-dire ce que l'on nomme la *densité* du liquide. Prenons pour exemple le mercure, dont la densité est 13,6 ; nous observerons que, d'après cette densité, le poids d'un centimètre cube de mercure sera de 13gr,6. En conséquence, nous pouvons dire que la pression en A (fig. 294), rapportée au centimètre carré, est d'autant de fois 13gr,6, que la hauteur AB contient de centimètres.

§ 222. Il résulte évidemment de ce qui précède que si, au lieu de prendre la pression rapportée à l'unité de surface en un point de la paroi, on voulait obtenir la pression supportée par une très-petite portion de cette paroi, on n'aurait qu'à évaluer le poids d'un cylindre du liquide proposé, qui aurait pour base cette petite portion de paroi, et pour hauteur la distance verticale d'un de ses points au-dessous de la surface libre du liquide.

Lorsqu'on voudra évaluer la pression supportée par une portion quelconque de la paroi contre laquelle le liquide s'appuie, il faudra décomposer cette portion de paroi en très-petites parties ; on déterminera ensuite la pression exercée par le liquide sur chacune de ces parties, puis on composera entre elles toutes les pressions ainsi obtenues.

Si la portion de paroi qu'on considère est plane, toutes les pressions supportées par ses diverses parties auront des directions parallèles, et par suite ces pressions auront toujours une résultante, qui sera égale à leur somme (§ 25). Concevons qu'on ait déterminé le centre de gravité de la portion de la paroi qui nous occupe, en la regardant comme une surface pesante (§ 40) ; la

que sa température soit celle du *maximum* de densité. Mais dans les applications, lorsqu'il s'agit de trouver les pressions exercées par l'eau ordinaire, on peut supposer que 1 centimètre cube de cette eau pèse toujours 1 gramme ; l'erreur commise ainsi est généralement sans importance.

résultante dont nous venons de parler sera égale au poids d'un cylindre du liquide, qui aurait pour base toute cette portion de paroi, et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité au-dessous de la surface libre du liquide. Quant au point d'application de la résultante, point que l'on nomme le *centre de pression*, ce ne sera pas le centre de gravité de la portion de paroi que l'on considère, mais un point situé plus bas que ce centre de gravité. Nous nous contenterons d'énoncer ces résultats, que l'on démontre dans les traités de mécanique rationnelle, et d'en vérifier l'exactitude dans un exemple particulier.

§ 223. Soit AB (fig. 295), une paroi plane et inclinée contre laquelle vient s'appuyer une masse d'eau en équilibre. Supposons que cette paroi ait la forme d'un rectangle, et que deux de ses côtés soient horizontaux; ce sera, par exemple, une vanne destinée à maintenir le liquide, et pouvant se lever pour le laisser couler en cas de besoin.

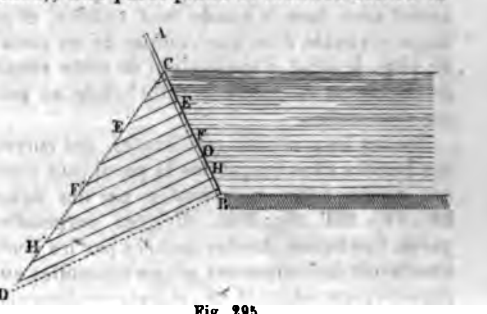


Fig. 295.

Nous admettrons, comme précédemment, qu'aucune pression n'agisse sur la surface libre du liquide, et que cette surface, qui sera plane et horizontale, vienne se terminer en C sur la paroi plane que nous considérons; l'eau pressera donc seulement la portion CB de cette paroi, portion qui sera également rectangulaire. Pour évaluer la pression exercée par l'eau sur tout ce rectangle, nous le diviserons en un grand nombre de bandes horizontales, en traçant idéalement sur sa surface des parallèles à sa base, également éloignées les unes des autres, ainsi que le montre la figure 296.

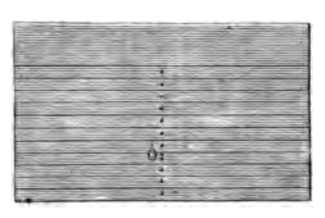


Fig. 296.

Nous concevrons ensuite que chacune de ces bandes soit divisée à son tour en un grand nombre de petits rectangles égaux, par des lignes perpendiculaires à sa longueur (fig. 297). La

pression supportée par chacun de ces petits rectangles sera égale au poids d'un prisme d'eau ayant pour base ce rectangle, et pour hauteur la distance verticale d'un de ses points à la surface libre du liquide. Toutes les pressions supportées par les divers rectangles, dans lesquels une même bande a

Fig. 297.

été décomposée, sont égales entre elles, puisque ces rectangles sont tous à une même profondeur au-dessous de la surface libre du liquide. La résultante de ces pressions, obtenue en faisant leur somme, sera donc égale au poids d'un prisme d'eau qui aurait pour base la bande tout entière, et pour hauteur la distance verticale d'un quelconque de ses points à la surface libre : de plus, le point d'application de cette résultante sera placé au milieu de la longueur de cette bande, au point où se croiseraient ses diagonales.

Toutes les pressions résultantes, qui correspondent aux diverses bandes dans lesquelles la paroi tout entière a été décomposée, peuvent être représentées par des lignes droites telles que EE', FF', HH' (fig. 295), dirigées perpendiculairement à cette paroi. Ces lignes droites menées par les centres des bandes doivent avoir des longueurs proportionnelles aux forces auxquelles elles correspondent (§ 19), et par conséquent aussi proportionnelles aux distances verticales de ces centres à la surface libre de l'eau, ou bien encore à leurs distances au point C : leurs extrémités E', F', H' sont donc toutes situées sur une même ligne droite CD passant par le point C où aboutit la surface libre du liquide. Il ne s'agit plus que de trouver la résultante de toutes les forces parallèles que représentent ces lignes, résultante qui sera la pression totale supportée par notre paroi rectangulaire AB.

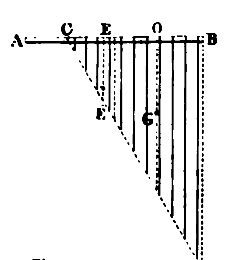


Fig. 298.

Pour y arriver, imaginons que cette paroi soit placée horizontalement, comme l'indique la figure 298 ; les lignes qui représentent les forces appliquées aux centres des diverses bandes dans lesquelles nous l'avons décomposée deviendront verticales. Nous pourrons alors concevoir que ces lignes soient remplacées par des tiges pesantes de même longueur, suspendues à la paroi AB, et tellement choisies que le poids de chacune d'elles soit équivalent à la force dont elle tient la place. La paroi AB sera chargée par le poids de ces tiges, comme

elle l'était précédemment par la pression de l'eau en ses divers points. Or, si ces diverses tiges sont aplaties, de manière à présenter une largeur uniforme assez grande pour être en contact les unes avec les autres, on voit que la charge totale supportée par la paroi AB n'est autre que le poids du triangle pesant BCD; et comme ce poids est une force verticale, appliquée au centre de gravité G du triangle, il s'ensuit que la résultante définitive des pressions exercées par l'eau sur les diverses parties de la paroi AB passe par le point O, situé verticalement au-dessus du centre de gravité G, point qui est en conséquence au tiers de la longueur BC, à partir du point B. Ainsi le centre de pression, pour la paroi rectangulaire AB que nous considérons (fig. 295), est placé sur la ligne qui joint les milieux des côtés horizontaux du rectangle pressé par l'eau, et au tiers de cette ligne à partir du fond.

Quant à la grandeur de la pression totale, on voit par la figure 298 qu'elle serait la même si toutes les tiges pesantes, au lieu de croître uniformément en longueur de C en B, avaient toutes la même longueur que celle qui est au milieu de CB. On peut donc dire que la pression totale, supportée par la paroi rectangulaire AB, est égale à celle qu'elle supporterait, si tous ses points étaient à la même distance verticale de la surface libre que son centre de gravité, qui est le milieu de BC; ou bien encore, que cette pression totale est égale au poids d'un prisme d'eau qui aurait pour base toute la surface pressée, et pour hauteur la distance verticale du centre de gravité de cette surface à la surface libre du liquide.

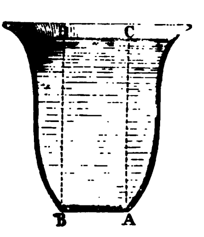


Fig. 299.

§ 224. Il résulte de ce qui précède que la pression exercée par un liquide sur le fond AB du vase qui le contient (fig. 299), est égale au poids de la colonne ABCD de liquide située verticalement au-dessus de ce fond; en sorte que cette pression ne dépend que de la grandeur du fond, et de la hauteur de la surface libre du liquide. La forme des parois latérales du vase n'influe en aucune manière sur cette pression, et, lors même que le vase serait rétréci vers le haut (fig. 300 et 301), la pression *sur le fond serait* toujours égale au poids du

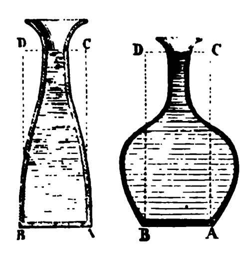


Fig. 300. Fig. 301.

liquide que contiendrait le cylindre ABCD, quoique le contour de ce cylindre ne soit pas tout entier contenu à l'intérieur du liquide.

Cette conséquence singulière des principes dont nous venons de reconnaître l'existence peut être vérifiée de la manière suivante, à l'aide de l'appareil de de Haldat. Cet appareil (fig. 302)

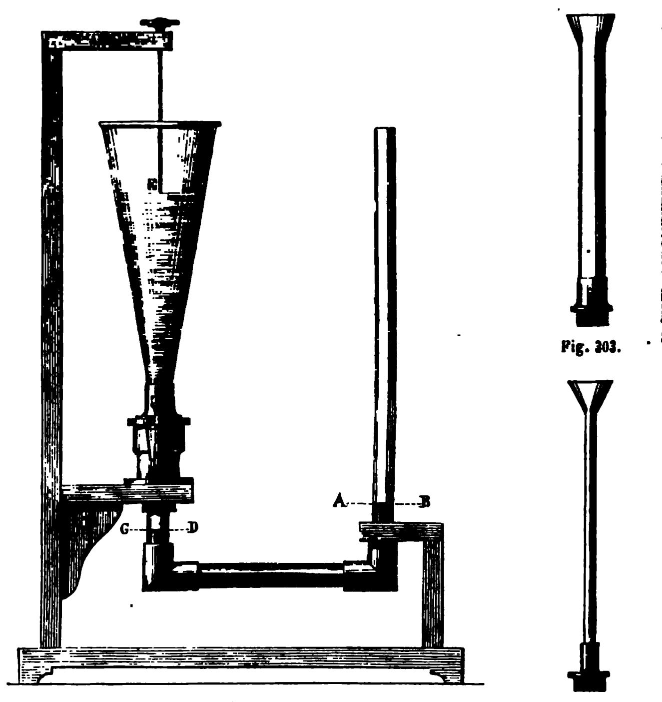


Fig. 302. Fig. 303. Fig. 304.

se compose d'un tube horizontal, aux deux extrémités duquel sont adaptés deux autres tubes qui se relèvent verticalement. L'un de ces deux derniers tubes, plus court que l'autre, est muni d'une garniture métallique *a* portant intérieurement un filet de vis, à laquelle on peut fixer successivement des vases de formes différentes. Le vase fixé sur cette garniture métallique, dans la figure 302, s'élargit constamment depuis le bas jusqu'au haut, et présente ainsi à peu près la forme d'un entonnoir. Les figures 303 et 304 représentent deux autres vases, qui peuvent être montés

sur la même garniture métallique : ce sont de simples tubes de diamètres différents, qui s'élargissent vers le haut pour qu'on puisse facilement y verser un liquide. Pour faire l'expérience à laquelle cet appareil est destiné, on verse du mercure à l'intérieur, jusqu'à ce que le tube horizontal en soit plein, ainsi qu'une portion de chacun des deux tubes verticaux. Le mercure monte également dans ces deux tubes : mais si l'on vient à presser sur la surface libre de ce liquide dans le tube de gauche, il sera refoulé dans l'autre tube, et s'y élèvera d'autant plus que la pression aura été plus forte. Pour produire cette pression, on verse de l'eau dans le vase qui surmonte la garniture métallique *a*. L'eau vient s'appuyer sur la surface libre CD du mercure, surface qui forme en réalité le fond du vase qui contient l'eau ; et la pression que le mercure éprouve le fait monter dans l'autre tube, jusqu'au niveau AB. On marque ce niveau sur le tube, en y collant un petit index de papier. Cela fait, on retire l'eau à l'aide d'un robinet dont la garniture métallique *a* est munie; on dévisse le vase qui surmonte cette garniture, pour le remplacer par un autre d'une forme différente (fig. 303 ou 304), puis on verse de l'eau dans le nouveau vase, jusqu'à la même hauteur que précédemment, ce que l'on reconnaît à l'aide d'une tige E, dont l'extrémité inférieure doit seulement toucher la surface du liquide. En examinant alors la surface libre du mercure dans le tube de droite, on voit qu'elle se trouve au niveau marqué par l'index de papier : la pression supportée par la surface CD du mercure est donc la même dans les deux cas, quoique les parois latérales des vases, auxquels cette surface a successivement servi de fond, aient des formes très-différentes.

§ 225. Si un vase avait un large fond, et se rétrécissait ensuite de manière à présenter dans toute sa hauteur des dimensions transversales plus petites que celles de son fond (fig. 301), la pression exercée sur le fond par le liquide contenu dans ce vase serait plus grande que le poids total du liquide. Voici comment on peut se rendre compte de ce résultat, qui semble, au premier abord, être tout à fait impossible.

Si l'on pèse un vase vide, puis qu'on le pèse de nouveau après y avoir versé un liquide, l'augmentation de poids qu'on trouve est égale au poids du liquide qui a été mis dans le vase. Voyons de quelle manière le liquide agit sur le vase, pour lui communiquer cette augmentation de poids. Chaque portion de la paroi intérieure du vase qui est touchée par le liquide en éprouve une pression dépendant de son étendue et de sa distance verticale à la surface libre du liquide. Ce sont toutes ces pressions, exercées

par le liquide sur les diverses parties de la paroi du vase avec laquelle il est en contact, qui se composent pour donner lieu à une résultante égale au poids de tout le liquide ; en sorte qu'en définitive le vase est soumis à son poids propre, et à l'action de cette résultante. Mais il ne faut pas confondre la résultante dont nous parlons avec la pression que le liquide exerce sur le fond du vase ; car ce fond n'est qu'une partie de la surface qui est touchée par le liquide. La résultante de toutes les pressions que le liquide exerce contre le vase peut s'obtenir en composant entre elles les pressions exercées aux divers points des parois latérales, puis composant la résultante partielle ainsi obtenue avec la pression supportée par le fond : or, il peut arriver que cette résultante partielle, au lieu d'augmenter la pression appliquée au fond du vase, en se composant avec elle, la diminue au contraire. C'est ce que nous ferons facilement comprendre.

La pression en un point C de la paroi d'un vase (fig. 305), est dirigée suivant la ligne CD perpendiculaire à la paroi en ce point. Cette pression, qui agit du dedans au dehors, peut être décomposée en deux forces, dont l'une CE est horizontale, et l'autre CF est verticale. La dernière composante est dirigée de bas en haut, sur la figure 305 ; elle aurait été dirigée de haut en bas, si le point C eût été pris plus bas, à une petite distance du fond AB. Si l'on effectue une décomposition analogue, pour toutes les pressions que supportent les diverses portions de la paroi latérale du vase, on trouvera une série de composantes horizontales telles que CE, et une série de composantes verticales telles que CF. Les composantes horizontales, dont les directions divergent tout autour du vase, se détruisent mutuellement, ainsi qu'on le reconnaît en étudiant la question plus à fond : il est clair d'ailleurs que, si elles ne se détruisaient pas, elles tendraient à faire mouvoir le vase horizontalement, ce qui évidemment ne peut pas arriver.

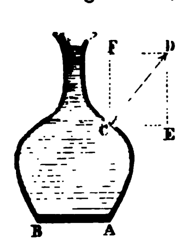


Fig. 305.

Quant aux composantes verticales, elles sont toutes parallèles entre elles ; les unes sont dirigées de bas en haut, les autres de haut en bas. Ces composantes verticales pourront donc être remplacées par une force unique, également verticale, qui sera dirigée de bas en haut ou de haut en bas, suivant les cas (§ 27). La force unique ainsi obtenue sera précisément la résultante partielle dont nous avons parlé plus haut. On voit donc que cette résultante partielle augmentera ou diminuera la pression sup-

portée par le fond du vase, en se composant avec elle, suivant qu'elle agira de haut en bas ou de bas en haut. Dans le premier cas, la pression supportée par le fond du vase sera plus petite que le poids total du liquide; dans le second cas, elle sera plus grande que ce poids.

§ 226. Nous pouvons, à l'aide de ce qui précède, nous rendre compte de la grandeur des pressions supportées, dans certains cas, par les surfaces contre lesquelles s'appuie un liquide. Prenons pour exemple un *serrement*, espèce de cloison que l'on construit à l'intérieur d'une mine, dans une galerie (A B, fig. 306), pour inter-

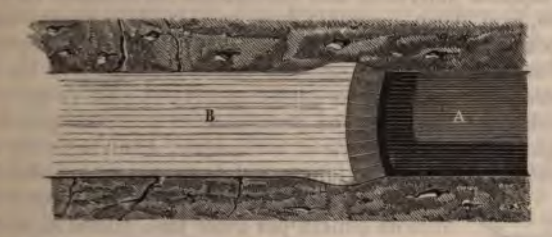


Fig. 306.

cepter toute communication entre la partie A et la partie B et empêcher ainsi que les eaux qui arrivent en B, par des fissures du terrain, ne viennent inonder la partie A. En B, la galerie se remplit complétement d'eau, et le liquide s'étend sans discontinuité dans toutes les fissures qui y communiquent, jusqu'à une grande hauteur au-dessus de la galerie, hauteur qui va souvent à plusieurs centaines de mètres. Supposons, pour fixer les idées, que la surface libre de l'eau, dans les fissures du terrain, soit à 100 mètres au-dessus du centre du serrement. La pression supportée par un mètre carré de la surface du serrement sera égale au poids de 100 mètres cubes d'eau, c'est-à-dire qu'elle sera égale à 100 000 kilogrammes ; si le serrement a une surface de 2 mètres carrés, la pression totale qu'il supportera sera de 200 000 kilogrammes. On conçoit par là combien on doit apporter de soin à la construction d'un serrement, pour qu'il puisse résister à une si énorme pression. Souvent on le construit en forme de voûte (fig. 306), de manière que la pression s'exerce sur la surface convexe de cette voûte ; par cette disposition, on voit que le serrement ne peut céder à la pression du liquide qu'en écartant les parois de la galerie contre lesquelles il s'appuie.

Dans la partie B de la mine qui est inondée, l'eau exerce aussi

une pression énorme sur toutes les parois qu'elle touche. Cette pression s'exerce aussi bien sur les parois supérieures des cavités où elle est répandue, que sur leur sol et sur les parois latérales. Aussi l'eau contribue-t-elle puissamment, en pareil cas, à soutenir le terrain qui est au-dessus de ces cavités; et si l'on vient à l'épuiser à l'aide de pompes, pour reprendre les travaux dans les parties de la mine qui étaient inondées, il se produit des éboulements nombreux, en raison de ce que le terrain n'est plus soutenu comme il l'était auparavant.

§ 227. **Surface de séparation de deux liquides.** — Lorsque deux liquides différents, non susceptibles de se mêler l'un avec l'autre, sont placés ensemble dans un vase, ils occupent chacun une portion de la capacité du vase, et se touchent le long d'une certaine surface qui leur sert de limite commune. Si les deux liquides n'ont pas la même densité (§ 221), et c'est ce qui arrive généralement, l'équilibre ne peut subsister qu'autant que la surface qui les sépare est plane et horizontale. Admettons, en effet, que cette surface n'ait pas tous ses points sur un même plan horizontal (fig. 307), et nous allons voir que l'équilibre ne pourra pas avoir lieu. Soient A, B, deux points situés sur un même plan horizontal, dans le liquide inférieur; et C, D, deux autres points situés verticalement au-dessus des deux premiers, aussi sur un même plan horizontal, dans le liquide supérieur. Les verticales AC, BD, perceront la surface de séparation des deux liquides aux points E, F; et l'on pourra supposer que les points A, B, aient été choisis de manière que les hauteurs AE, BF soient inégales, ce qui est toujours possible, dans l'hypothèse qui a été faite. Si l'équilibre a lieu, les pressions aux points C, D, doivent être égales (§ 213). Mais en appliquant ici le raisonnement du § 214, on trouvera que la pression en A, sur une très-petite surface horizontale, sera égale à celle qui a lieu en C, sur une pareille surface, augmentée du poids du liquide qui serait contenu dans un cylindre vertical ayant ces deux surfaces pour bases inférieure et supérieure. De même, la pression en B, sur une surface de même étendue, sera égale à la pression qui a lieu en D, sur une surface égale, augmentée du poids du liquide que contiendrait un cylindre vertical s'étendant de B en D, et ayant ces deux surfaces pour bases. Mais le poids du liquide contenu dans le premier de ces deux cylindres ne peut pas être le même que celui du liquide contenu dans le second; puisque les capacités de ces deux cylindres sont égales, et que dans l'un des deux le liquide le plus lourd entre en plus

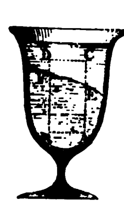


Fig. 307.

grande quantité que dans l'autre : ce qui ne peut pas être compensé par la différence correspondante entre les quantités du liquide le moins lourd qui entrent dans chacun d'eux. Il résulte de là que les pressions qui ont lieu en A et B, sur deux petites surfaces d'égale étendue, ne sont pas égales entre elles. Donc l'équilibre ne peut pas exister, puisqu'une conséquence nécessaire de cet équilibre, c'est que les pressions soient les mêmes, à égalité de surface, pour tous les points situés sur un même plan horizontal, pris comme on voudra à l'intérieur de la masse liquide (§ 213).

Nous pouvons donc dire que, toutes les fois que deux liquides pesants, de densités différentes, se trouveront dans un même vase, ils se disposeront de manière que leur surface de séparation soit plane et horizontale. Nous pouvons dire en outre que le liquide le plus lourd, celui dont la densité est la plus grande, se placera au-dessous de l'autre. Cette dernière condition n'est pas indispensable pour l'équilibre, qui aurait lieu tout aussi bien si le liquide le moins dense était au fond du vase, et qu'il fût surmonté du liquide le plus dense : mais dans ce cas l'équilibre serait instable, et la grande mobilité des liquides ferait que la plus légère cause le troublerait, pour ramener le liquide le plus dense au fond du vase.

Si un même vase contient plus de deux liquides, de diverses densités, et non susceptibles de se mêler, il est clair que ces liquides se disposeront les uns au-dessus des autres, de manière que leurs densités décroissent en allant du fond à la surface, et que la surface de séparation de deux d'entre eux soit plane et horizontale. C'est ainsi que si l'on verse dans un vase du mercure, de l'eau et de l'huile, qu'on agite le tout et qu'on le laisse ensuite reposer, le mercure se placera au fond du vase, l'eau surmontera le mercure, puis au-dessus de l'eau viendra l'huile.

§ 228. **Vases communiquants.** — Lorsque deux vases communiquent l'un avec l'autre par leurs parties inférieures, si l'on verse un liquide dans l'un de ces deux vases, il se répartit entre les deux, et s'y met en équilibre. La surface libre du liquide est plane et horizontale dans chacun de ces deux vases, ainsi que cela résulte de ce que nous avons vu précédemment. Mais si l'on compare les deux surfaces libres, on reconnaît qu'elles sont à une même hauteur ; c'est-à-dire que si l'on prolongeait le plan horizontal qui forme la surface du liquide dans l'un des deux vases, ce plan coïnciderait avec la surface du liquide dans l'autre vase. C'est ce dont nous nous rendons compte facilement de la manière suivante.

Soient A, B (fig. 308), deux points pris à l'intérieur du liquide, sur une ligne *horizontale qui traverse* le tuyau de communica-

tion des deux vases ; l'équilibre exige que les pressions en ces deux points soient égales (§ 213). La pression au point A est égale au poids d'un cylindre du liquide que l'on considère ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance AC du point A à la surface libre du liquide dans le vase de droite. La pression au point B ne se trouvera pas aussi facilement, en raison de la forme du vase de gauche ; voici comment on pourra l'obtenir. La pression en B est égale à la pression en D, augmentée du poids d'un cylindre du liquide ayant pour hauteur BD, et pour base l'unité de surface. La pression en D est la même que celle qui a lieu en E ; mais la pression en E est égale à la pression en F, augmentée du poids d'un cylindre du liquide ayant pour hauteur EF, et pour base l'unité de surface : donc la pression en B est égale à la pression en F, augmentée du poids du liquide que contiendraient deux cylindres ayant tous deux pour base l'unité de surface, et pour hauteurs, l'un BD, l'autre EF. En continuant de la même manière, et observant que la pression en M est nulle, on arrivera à trouver que la pression en B est égale au poids du liquide que contiendraient cinq cylindres, ayant tous pour base l'unité de surface, et ayant pour hauteurs les lignes BD, EF, GH, IK, LM. Les pressions en A et B devant être égales, il en résulte que la somme des cinq lignes BD, EF, GH, IK, LM, doit être égale à la ligne AC ; ou, en d'autres termes, les surfaces libres du liquide, dans les deux vases, doivent se trouver à une même distance verticale au-dessus du plan horizontal qui passe par les deux points A et B. Donc, en définitive, ces surfaces libres doivent être situées sur un même plan horizontal.

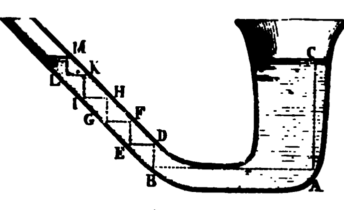


Fig. 308.

L'appareil représenté par la figure 309 permet de vérifier très-facilement le principe que nous venons de trouver. Cet appareil se compose d'un vase de verre muni inférieurement d'un tuyau horizontal, à l'extrémité duquel est adapté un tube de verre qui se relève verticalement. Quand on verse de l'eau dans le vase, elle se répand en partie dans le tube de verre, en passant par le tuyau horizontal qui le relie au vase ; et il est aisé de reconnaître que les surfaces libres sont à un même niveau AB, dans le tube et dans le vase. Si ensuite on enlève le tube de verre pour le remplacer par un autre tube d'une forme différente (fig. 310 ou 311), on voit que

le niveau de l'eau A'B', ou A"B", est toujours situé dans le pro-

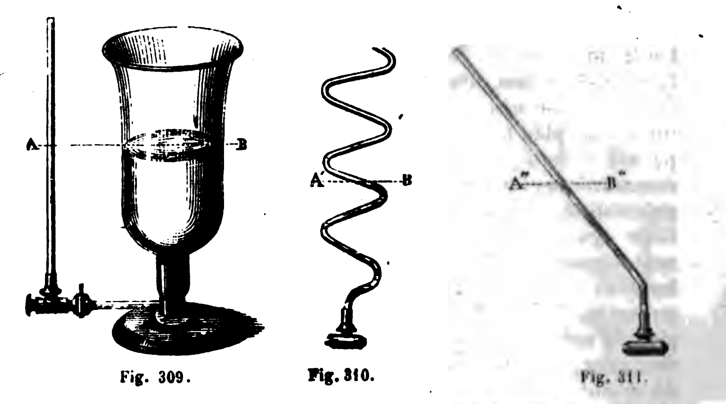


Fig. 309. Fig. 310. Fig. 311.

longement de la surface libre du liquide dans le vase. Un robinet, placé sur le tuyau horizontal, permet d'interrompre ou de rétablir à volonté la communication entre le vase et le tube, et facilite ainsi la substitution d'un tube à un autre, sans qu'on ait besoin de vider le vase chaque fois.

§ 229. Lorsque deux liquides de densités différentes, et non susceptibles de se mêler, sont introduits ensemble dans des vases communiquants, les choses ne se passent pas de la même manière que dans le cas où il n'y a qu'un seul liquide. Supposons, par exemple, qu'on ait pris un tube de verre doublement recourbé, (fig. 312), et ouvert à ses deux extrémités, et que, le tube étant placé comme l'indique la figure, on y ait versé du mercure : ce liquide, se répandant dans la partie horizontale et dans les deux branches verticales, s'y sera mis en équilibre, et ses surfaces libres, dans ces deux branches, auront été au même niveau. Si l'on a ensuite versé de l'eau dans la branche de gauche, cette eau, en pressant sur le mercure, a dû la faire passer en partie dans la branche de droite, où son niveau se sera élevé. Mais, lorsque l'équilibre est établi, la surface libre de l'eau dans la branche de gauche ne se trouve pas au même niveau que celle du mercure dans la branche de droite ;

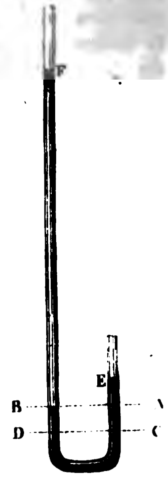


Fig. 312.

ces deux surfaces doivent au contraire être situées à des hauteurs très-différentes, ainsi que nous allons le reconnaître.

Pour cela, examinons les pressions qui ont lieu, dans l'une et l'autre branche, sur le plan horizontal AB, qui passe par la surface de séparation des deux liquides. L'équilibre du mercure exige que la pression soit la même pour tous les points situés sur un même plan horizontal CD inférieur à AB; car s'il n'en était pas ainsi, le liquide répandu dans la portion du tube qui fait communiquer les deux branches serait inégalement pressé en des points situés sur un même plan horizontal, ce qui est impossible. Cette égalité de pression, pour tous les points d'un plan horizontal quelconque CD, qui ne rencontre que du mercure dans les deux branches, aura encore lieu pour celui de tous ces plans qui est le plus élevé, c'est-à-dire pour le plan AB. Il n'en serait plus de même pour un plan horizontal supérieur à AB, c'est-à-dire pour un plan qui rencontrerait du mercure dans la branche de droite, et de l'eau dans la branche de gauche. Observons maintenant que la pression qui s'exerce en un point du plan AB, dans la branche de droite, est égale au poids d'un cylindre de mercure qui aurait pour base l'unité de surface, et pour hauteur la distance verticale de la surface libre E du mercure au-dessus du plan AB; et que, de même, la pression qui s'exerce en un des points de ce plan, dans la branche de gauche, est égale au poids d'un cylindre d'eau ayant pour base l'unité de surface, et pour hauteur la distance verticale de la surface libre F de l'eau au-dessus du même plan AB. Puisque ces pressions doivent être égales, il en résulte que les poids des deux cylindres de mercure et d'eau doivent être égaux, ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que les hauteurs de ces cylindres sont inversmeent proportionnelles aux densités des liquides qu'ils contiennent. Ainsi, pour l'équilibre, la hauteur de la surface libre F de l'eau au-dessus du plan AB devra être égale à 13,6 fois la hauteur de la surface libre E du mercure au-dessus de ce plan, puisque les densités du mercure et de l'eau sont entre elles dans le rapport de 13,6 à 1.

En général, on peut conclure de ce qui précède que, *pour que deux liquides différents soient en équilibre dans des vases communiquants, il faut que les hauteurs des surfaces libres de ces deux liquides, au-dessus du plan horizontal qui passe par leur surface de séparation, soient inversement proportionnelles aux densités de ces deux liquides.*

§ 230. **Liquides soumis à des forces quelconques.** — Si les molécules d'un liquide ne sont pas soumises à la seule action de la pesanteur, outre les forces moléculaires qui existent tou-

jours, les circonstances qui accompagnent l'équilibre du liquide seront différentes de celles que nous avons trouvées jusqu'à présent. Les pressions ne varieront pas de la même manière quand on passera d'un point à un autre de la masse liquide ; la surface libre du liquide n'aura pas la même forme. Occupons-nous spécialement de la surface libre, et voyons à quelles conditions elle devra satisfaire.

Soit A (fig. 313), une molécule prise sur la surface libre d'un liquide soumis à des forces quelconques. Concevons que nous ayons composé en une seule toutes les forces qui agissent sur cette molécule non compris les forces moléculaires, et que la résultante de toutes ces forces soit dirigée suivant la ligne AB. Si la portion de la surface libre du liquide qui avoisine le point A, portion qu'on peut toujours supposer plane, n'est pas perpendiculaire à la ligne AB, le liquide ne pourra pas être en équilibre. En effet, pour que le liquide fût en équilibre, il faudrait que la force dont nous venons de parler, qui agit suivant la ligne AB, fût détruite par la résultante des actions moléculaires auxquelles la molécule A est soumise. Mais cette résultante des actions moléculaires est dirigée suivant la perpendiculaire AC à la surface libre (§ 220). Si donc la force qui agit suivant AB était décomposée en une force dirigée suivant AC, et une autre force perpendiculaire à la première, la composante dirigée suivant AC pourrait seule être détruite par l'action des forces moléculaires ; et l'autre composante ferait nécessairement mouvoir la molécule A, sur la surface libre, pour l'amener dans une autre position. Ainsi l'équilibre ne pourra pas exister tant que la résultante des forces auxquelles est soumise chaque molécule située sur la surface libre, ne sera pas dirigée perpendiculairement à cette surface. Si, au contraire, cette résultante est dirigée perpendiculairement à la surface libre, on conçoit que l'équilibre puisse avoir lieu : puisque cette résultante, tendant à faire pénétrer la molécule dans l'intérieur de la masse liquide, déterminera le développement de certaines forces moléculaires, dont l'ensemble pourra s'opposer complétement à la production de ce mouvement, en donnant lieu à une résultante égale et de sens contraire.

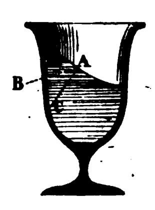


Fig. 313.

§ 231. Nous pouvons donner, comme application de ce qui précède, l'exemple d'un vase qui contient de l'eau, et qui est animé d'un mouvement uniforme de rotation autour d'un axe vertical AB (fig. 314). Le mouvement peut être communiqué au

vase, comme le montre la figure, à l'aide d'une manivelle C et de deux poulies D, E, dans la gorge desquelles passe une corde sans fin. Pendant le mouvement, chaque molécule du liquide est sou-

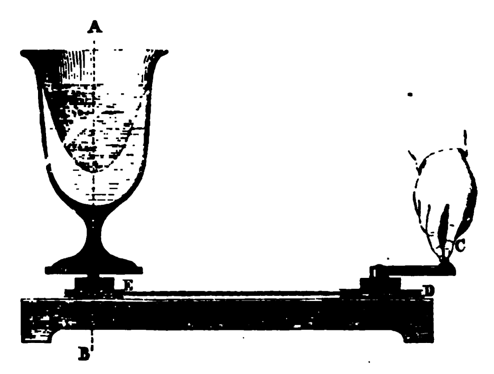


Fig. 314.

mise d'une part à son poids, d'une autre part à une force centrifuge dirigée horizontalement, et tendant à l'éloigner de l'axe AB. Si l'on compose ces deux forces en une seule, on trouvera une résultante oblique, située dans un plan passant par l'axe AB. Il faudra donc, pour l'équilibre du liquide, que sa surface libre ne reste pas plane et horizontale ; mais qu'elle se déforme, comme l'indique la figure, afin qu'en chacun de ses points elle soit perpendiculaire à la résultante des deux forces appliquées à la molécule liquide qui y est située. La surface deviendra concave, par l'effet du mouvement de rotation, et sa concavité sera d'autant plus prononcée que le mouvement sera plus rapide; la ligne courbe suivant laquelle cette surface sera coupée par un plan quelconque passant par l'axe AB, aura la forme d'une parabole (§ 105).

§ 232. La figure que présente la surface de la terre dans son ensemble, abstraction faite des aspérités du sol, est un autre exemple remarquable que l'on peut donner comme application du principe du § 230. Tout porte à croire qu'à une époque très-reculée la masse entière de la terre était liquide, et que c'est par un refroidissement progressif que sa surface s'est solidifiée, et est ainsi parvenue à l'état que nous lui connaissons. Cette masse liquide, si elle n'avait pas été animée d'un mouvement de rotation, aurait naturellement pris la figure d'une sphère, en raison de l'attraction

mutuelle qui s'exerçait entre ses diverses molécules, et qui tendait à les rapprocher le plus possible les unes des autres. Les matières liquides de différentes densités qui en faisaient partie se seraient disposées régulièrement tout autour de son centre, en couches sphériques concentriques ; et la résultante de toutes les attractions auxquelles une molécule de la surface aurait été soumise, de la part des autres molécules, aurait été dirigée perpendiculairement à cette surface, puisqu'elle aurait nécessairement passé par le centre de toute la masse. Mais le mouvement de rotation de la terre autour de la ligne des pôles l'a empêchée de prendre cette forme sphérique. On voit en effet qu'un mouvement, en vertu duquel chaque point décrit une circonférence de cercle dans l'espace d'environ 24 heures, donne lieu au développement d'une force centrifuge AB (fig. 315), pour chaque molécule non située sur l'axe de rotation PP' ; cette force se compose avec la résultante AC des attractions que la molécule éprouve de la part de toutes les autres, et oblige ainsi la masse liquide à prendre une autre forme que si la résultante AC agissait seule. Si la surface était restée la même que dans le cas où le mouvement de rotation n'eût pas existé, la force AC aurait été dirigée vers le centre O, et la résultante AD des deux forces AB, AC, n'aurait pas été dirigée vers ce centre : donc elle n'aurait pas été perpendiculaire à la surface libre du liquide, ce qui ne peut avoir lieu. Ainsi, par suite de l'action des forces centrifuges que le mouvement de rotation développe dans les diverses molécules non situées sur l'axe, la surface a dû s'aplatir dans le sens de la ligne des pôles, et se renfler dans le voisinage de l'équateur, pour prendre une forme telle que l'indique la ligne ponctuée *mm*, tout en l'exagérant beaucoup.



Fig. 315.

La surface de la terre s'étant solidifiée peu à peu par le refroidissement, la croûte solide qui s'est ainsi formée a conservé, dans son ensemble, la figure aplatie qu'avait la surface lorsqu'elle était liquide. Quant aux eaux de la mer, qui la recouvrent en grande partie, elles sont dans les mêmes conditions que la masse liquide qui composait primitivement la totalité du globe terrestre : la surface de ces eaux est également aplatie vers les pôles, et ren-

flée vers l'équateur. Si la terre cessait de tourner autour de son axe, et que sa croûte solide ne changeât pas de forme, les eaux de la mer se retireraient du voisinage de l'équateur, et viendraient s'accumuler vers les pôles, afin de se rapprocher de la figure sphérique.

§ 233. La verticale, dont la direction est déterminée par le fil à plomb (§ 98), est la ligne suivant laquelle agit sur un corps la force que nous avons nommée le *poids* de ce corps. Cette force est la résultante des attractions que toutes les molécules de la terre exercent sur le corps, et de la force centrifuge à laquelle il est soumis en vertu du mouvement de rotation de la terre. Il résulte de ce qui a été dit dans le § 230, que la verticale doit être perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, en chaque point de cette surface. Quand nous avons dit que la surface libre d'un liquide pesant en équilibre devait être plane et horizontale (§§ 219 et 220), nous avons supposé implicitement que les verticales menées par les divers points de cette surface pouvaient être regardées comme parallèles entre elles. Si l'étendue de la surface du liquide est assez grande pour qu'on ne puisse plus regarder les verticales menées par ses différents points comme parallèles entre elles, on ne pourra plus dire que cette surface soit plane ; mais on dira qu'elle est partout perpendiculaire à la verticale. C'est ainsi que la surface d'un lac présente une courbure très-sensible.

Si des causes extérieures venaient à faire varier la direction du fil à plomb en un même lieu, la direction de la surface des eaux tranquilles dans ce lieu varierait en conséquence. Or, c'est précisément ce qui arrive tous les jours, par suite des attractions que le soleil et la lune exercent sur les corps placés à la surface de la terre. D'après les découvertes faites par Newton, deux corps placés dans l'espace, à telle distance qu'on voudra l'un de l'autre, s'attirent proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance. Le soleil et la lune attirent donc constamment vers eux le corps pesant qui est suspendu à l'extrémité inférieure d'un fil à plomb, tout aussi bien qu'ils attirent la terre. Ces attractions, combinées avec celles que ces deux astres exercent en même temps sur la terre, font que le fil à plomb ne se trouve pas dans les mêmes conditions que si ces astres n'existaient pas : la direction du fil à plomb est un peu différente de ce qu'elle serait si le corps pesant suspendu au fil était soumis seulement à l'attraction de la terre et à la force centrifuge qui résulte de son mouvement de rotation. Mais le soleil et la lune ne sont pas toujours placés de la même manière par rapport au fil

à plomb : tantôt ils sont situés tous deux à l'orient, ou tous deux à l'occident; tantôt ils se trouvent l'un d'un côté, l'autre de l'autre : chacun de ces astres change constamment de position dans l'espace d'une journée. Il en résulte que leur influence sur le fil à plomb le fait dévier de sa direction naturelle, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, et cela périodiquement.

Les changements de direction qu'éprouve le fil à plomb aux diverses heures d'une même journée, en vertu des actions dont nous venons de parler, sont tellement faibles, que l'observation la plus attentive n'en ferait pas reconnaître directement l'existence. La surface des eaux tranquilles, qui doit toujours être perpendiculaire au fil à plomb, doit participer à ses oscillations; elle doit tantôt s'incliner dans un sens, tantôt s'incliner en sens contraire. Le niveau de l'eau dans un lac doit, par exemple, s'élever et s'abaisser successivement sur un de ses bords, tandis qu'il s'abaisse et s'élève en même temps sur le bord opposé. Mais ce mouvement d'oscillation de la surface de l'eau est encore presque insensible quand on considère une petite étendue d'eau, telle qu'un lac ; et les mouvements accidentels dus aux agitations de l'air s'opposent à ce qu'on puisse en constater l'existence. Ce n'est que dans les grandes mers que ce mouvement oscillatoire de la surface, correspondant aux changements périodiques de direction du fil à plomb, peut devenir tout à fait sensible : c'est ce qui constitue le phénomène des *marées*. Sur les côtes, on voit la surface de la mer s'élever et s'abaisser successivement deux fois dans l'espace d'environ 25 heures. Ces mouvements de flux et de reflux sont dus aux changements d'inclinaison qu'éprouve périodiquement la surface de la mer, par suite des actions du soleil et de la lune sur le fil à plomb. Aux époques de pleine lune et de nouvelle lune, les effets de l'action simultanée des deux astres s'ajoutent, et c'est alors qu'ont lieu les grandes marées. Aux époques du premier ou du dernier quartier, au contraire, les actions du soleil et de la lune se contrarient, et les marées sont beaucoup moins fortes.

§ 234. **Capillarité.** — Lorsqu'on examine attentivement la surface de l'eau contenue dans un vase de verre, on reconnaît que cette surface est bien plane dans presque toute son étendue, mais que, tout près des parois du vase, elle se relève d'une manière très-prononcée. Nous allons voir à quoi tient cette espèce d'anomalie, qui semble être en contradiction avec ce que nous avons dit relativement à la surface libre d'un liquide pesant.

Lorsque nous avons démontré (§ 220) que la surface libre d'un liquide pesant doit être plane et horizontale, nous avons dit que

la résultante des actions qu'une molécule, située à la surface, éprouve de la part des molécules voisines, était dirigée suivant une ligne perpendiculaire à cette surface. Mais cela n'est vrai qu'autant que cette molécule n'est pas trop rapprochée de la paroi du vase qui contient le liquide, et les conséquences que nous en avons déduites ne sont exactes que pour les points de la surface qui satisfont à cette condition.

Voyons comment la proximité des parois peut influer sur la forme de la surface libre du liquide. Nous supposerons, pour cela, que la surface soit plane et horizontale, jusqu'à la paroi même (fig. 316), et nous chercherons si le liquide peut être en équilibre en conservant cette disposition. Soit A un point pris sur la surface du liquide, tout près de la paroi du vase. Décrivons autour du point A, comme centre, une surface sphérique telle, que toutes les molécules qui peuvent exercer une action sur la molécule située en A soient comprises à l'intérieur de cette sphère; ce sera ce que l'on nomme la *sphère d'activité* de la molécule A. Si cette sphère ne comprenait que des molécules liquides, on pourrait dire, comme nous l'avons fait (§ 220), qu'en raison de la symétrie, la résultante des actions moléculaires appliquées à la molécule A est dirigée perpendiculairement à la surface du liquide en ce point. Mais le point A étant situé très-près de la paroi, sa sphère d'activité pénètre dans la matière qui la compose; en sorte que la molécule A est soumise à la fois aux actions qui proviennent des molécules liquides, et des molécules de la paroi solide, qui sont comprises à l'intérieur de cette sphère. La symétrie n'existe donc plus, et l'on ne peut plus dire que la résultante des actions moléculaires appliquées au point A soit perpendiculaire à la surface du liquide, c'est-à-dire verticale, puisque nous avons supposé que cette surface était horizontale.

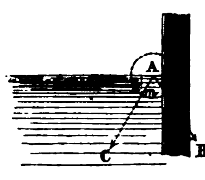


Fig. 316.

Admettons que la portion de paroi qui est située dans la sphère d'activité du point A soit terminée par une face plane et verticale, contre laquelle vient aboutir le liquide. Imaginons de plus que nous ayons mené dans le liquide, à gauche du point A, un plan vertical parallèle à la face plane de la paroi dont nous venons de parler, tellement placé d'ailleurs que le point A soit également distant de chacun de ces deux plans. Le liquide contenu à l'intérieur de la sphère d'activité du point A se trouvera divisé en deux portions *m*, *n*. Les actions moléculaires émanant de la por-

tion *m* du liquide auront évidemment une résultante verticale, à cause de la symétrie. Mais la portion *n* du liquide, et la portion *p* de paroi, qui agissent aussi sur la molécule A, donneront lieu à une résultante qui sera généralement oblique; et l'on conçoit que, selon la nature du liquide et celle de la paroi, cette résultante sera dirigée tantôt suivant une ligne telle que AB, tantôt suivant une ligne telle que AC. Dans l'un ou l'autre cas, la molécule A sera soumise : 1° à son poids, qui est une force verticale; 2° à la résultante verticale des actions moléculaires qui émanent de la partie *m* du liquide ; 3° à la résultante oblique des actions moléculaires qui viennent de la portion *n* du liquide, et de la portion *p* de la paroi. Elle ne pourra donc pas être en équilibre, et par suite la surface du liquide ne restera pas plane et horizontale. Si la troisième de ces forces est dirigée suivant une ligne telle que AB, la molécule A glissera vers la paroi ; le liquide s'accumulera dans le voisinage de cette paroi, et sa surface se relèvera, comme le montre la figure 317. Si cette troisième force est dirigée suivant AC, la molécule A s'éloignera de la paroi ; le liquide semblera être repoussé par elle, et sa surface s'abaissera, comme le montre la figure 318.



Fig. 317.

C'est le premier de ces deux cas qui se présente, lorsqu'on met de l'eau dans un vase de verre. L'eau se relève vers les bords, et vient pour ainsi dire s'attacher aux parois du vase, sur lesquelles il en reste d'ailleurs une couche adhérente, lorsqu'on retire l'eau du vase. Ce cas se rencontre toutes les fois que le liquide contenu dans le vase en *mouille* les parois.

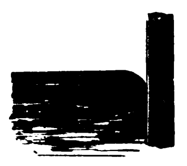


Fig. 318.

On voit un exemple du second cas, lorsqu'on met du mercure dans un vase de verre. La surface du mercure se déprime dans le voisinage des parois : et lorsqu'on retire le liquide, elles n'en retiennent aucune molécule. Cette dépression de la surface du liquide, dans les points où il est très-rapproché des parois, se produit toutes les fois que ces parois ne sont pas mouillées par le liquide.

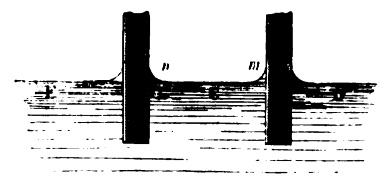


Fig. 319.

§ 235. Si l'on fait plonger dans l'eau les parties inférieures de deux lames de verre A, B (fig. 319), dont les faces sont verticales et parallèles, la surface de l'eau se relèvera de part et d'autre de chacune de ces deux lames, conformément à ce que nous venons de dire ; et si les deux lames sont convenablement éloignées l'une de l'autre, la forme qu'affectera la surface du liquide, dans le voisinage de l'une d'elles, ne sera nullement influencée par la présence de l'autre lame. Dans ce cas la surface sera plane et horizontale en C, entre les deux parties relevées *m*, *n*, et elle se trouvera au même niveau que les autres parties D, E, de la surface, situées en dehors des deux lames. Mais si, par une cause quelconque, la surface C se trouvait amenée à un niveau plus élevé, le liquide monterait en conséquence en *m*. Or, c'est ce qui arrivera, si l'on rapproche les deux lames (fig. 320), de telle ma-

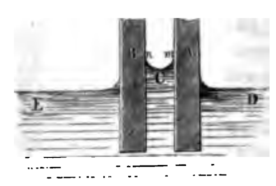
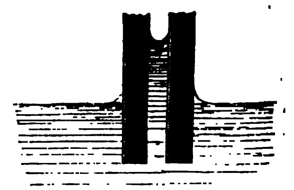


Fig. 320.


Fig. 321.

nière qu'il n'y ait plus de portion de surface qui reste plane en C. La partie relevée *m*, se terminant inférieurement à une portion de surface qui est elle-même relevée par l'action de la lame B, s'élèvera plus haut que quand elle aboutissait à la surface horizontale, qui s'étendait précédemment entre les deux lames de verre. De même, la partie *n* s'élèvera plus haut qu'elle ne s'élevait, et cela en raison de la présence de la partie relevée *m*. Ces deux espèces de talus liquides réagissent donc l'un sur l'autre, de manière à se maintenir dans des positions plus élevées que celles qu'ils prenaient lorsque les lames étaient plus éloignées; et le point le plus bas C de la surface du liquide compris entre ces lames se trouve placé au-dessus du niveau des parties extérieures D, E. On conçoit que, si l'on rapproche encore les lames de verre l'une de l'autre (fig. 321), l'effet dont on vient de parler sera encore plus prononcé, c'est-à-dire que le liquide montera plus haut entre les deux lames. L'élévation du liquide, qui se produira dans de pareilles circonstances, sera d'autant plus grande que les lames seront plus rapprochées. C'est ce que l'on met bien en évidence, en détruisant le parallélisme des lames, et les faisant se toucher par un de leurs bords, de manière que,

tout en restant verticales, elles forment entre elles un angle très-aigu (fig. 322); on voit alors le liquide s'élever dans l'espace angulaire qu'elles comprennent, et s'élever d'autant plus, qu'il est plus près de l'arête verticale suivant laquelle elles se touchent, c'est-à-dire d'autant plus qu'il se trouve dans un espace plus resserré entre elles.


Fig. 322.

§ 236. Lorsque de l'eau pénètre dans un tube de verre d'un très-petit diamètre, elle éprouve de la part des parois du tube une action analogue à celle qu'elle éprouvait de la part des deux lames de verre, entre lesquelles elle était resserrée. Cette action des parois tend à maintenir le liquide, dans le tube, à un niveau supérieur à celui qu'il prendrait si elle n'existait pas. C'est que, si l'on prend deux vases communiquants A, B (fig. dont l'un, A, soit un tube de verre d'un très-petit diamètre, l'eau que l'on introduira dans le vase B montera dans le tube A jusqu'à un point très-notablement plus élevé que la surface libre qui la terminera en B, tandis que les surfaces libres, de part et d'autre, devraient être à un même niveau (§ 228), si les parois avec lesquelles le liquide est en contact n'agissaient pas de manière à modifier ce résultat.

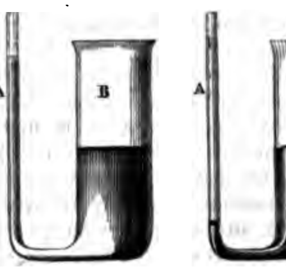


Fig. 323. Fig. 324.

Un phénomène analogue, mais inverse, se produit lorsqu'on introduit du mercure dans ces mêmes vases communiquants (fig. 324). Le niveau du mercure, dans le tube étroit A, se maintient très-notablement au-dessous de la surface horizontale qui le termine dans le vase B; tandis que, sans l'action que nous examinons en ce moment, le niveau devrait être le même de part et d'autre.

Les tubes, d'un très-petit diamètre, dans lesquels se produisent ces élévations ou dépressions de liquides, qui semblent en con-

tradiction avec les lois ordinaires de l'équilibre des liquides, ont reçu le nom de *tubes capillaires*; ce nom vient de ce qu'on assimile leurs dimensions intérieures à celle d'un cheveu. Par suite, on appelle *capillarité* l'ensemble des phénomènes dont nous venons de nous occuper, qui se produisent au contact des liquides et des solides, et qui sont dus aux actions moléculaires qu'éprouvent des molécules liquides situées très-près de ces corps solides. La capillarité joue un très-grand rôle dans la nature, et pour n'en citer qu'un exemple, il suffit de dire qu'elle contribue beaucoup à l'ascension de la séve dans les végétaux.

§ 237. **Transmission des pressions dans les gaz.** — Les gaz jouissent d'une propriété qui leur est commune avec les liquides : c'est la grande mobilité de leurs molécules, les unes par rapport aux autres. Mais il existe entre eux une différence essentielle. Une masse liquide est presque incompressible; quelque grand que soit l'effort qu'on lui applique, pour lui faire occuper un espace plus petit, la diminution de volume qui en résulte est à peine sensible. Une masse gazeuse, au contraire, cède facilement à l'action de l'effort qui tend à la comprimer; son volume se réduit à la moitié, au tiers, au quart de ce qu'il était précédemment, suivant que cet effort est plus ou moins grand. Si ensuite l'effort disparaît, le gaz reprend son volume primitif. De plus, si une masse gazeuse est contenue dans un vase fermé, et que la capacité du vase vienne à s'accroître d'une manière quelconque, le gaz se dilate aussitôt, pour occuper tout l'espace qui lui est offert.

La plupart des résultats auxquels nous sommes parvenus, relativement aux pressions dans les liquides, conviennent également aux gaz, en raison de la mobilité des molécules, qui est commune aux uns et aux autres. Mais la compressibilité et l'élasticité des gaz font que plusieurs de ces résultats ont besoin d'être modifiés, pour leur être applicables. Nous allons les passer en revue, afin d'indiquer en quoi consistent ces modifications.

Considérons d'abord une masse gazeuse, contenue dans un vase fermé, et dont les diverses molécules ne soient soumises qu'à leurs actions mutuelles. Ce gaz se trouvera dans les mêmes conditions que le liquide dont nous nous sommes occupés dans les paragraphes 207 à 211. Une seule différence devra être apportée aux considérations employées alors, pour qu'elles puissent convenir à notre masse gazeuse. Dans le cas d'un liquide, on pouvait appliquer telle force qu'on voulait à l'un des pistons qui remplaçaient des portions de paroi; et l'équilibre pouvait toujours exister, pourvu que les forces appliquées aux autres pistons eus-

sent un rapport convenable avec la première. Dans le cas d'un gaz, au contraire, la force qui doit être appliquée à chacun de ces pistons est entièrement déterminée par la force expansive du gaz. Si cette force n'était pas assez grande, le gaz repousserait le piston et sortirait; si elle était trop grande, le gaz se comprimerait, et le piston pénétrerait dans le vase. En tenant compte de cette différence, due à la compressibilité et à l'élasticité du gaz, et reprenant les raisonnements contenus dans les paragraphes 207 à 211, on arrivera aux conséquences suivantes.

1° Si une masse gazeuse est contenue dans un vase, et que deux pistons A, B (fig. 284, page 320), ferment exactement deux ouvertures pratiquées dans la paroi de ce vase, les forces qui devront être appliquées à ces deux pistons, pour maintenir le gaz en équilibre, seront entre elles comme les surfaces de ces deux pistons.

2° Si une masse gazeuse est contenue dans un vase fermé, les pressions que le gaz exerce sur diverses portions de la paroi du vase, en vertu de sa force expansive, sont proportionnelles aux étendues de ces portions de parois.

3° Si par un point A, pris à l'intérieur d'une masse gazeuse en équilibre, on mène différents plans, les pressions supportées par ces plans, et rapportées à l'unité de surface, seront toutes égales entre elles : chacune de ces pressions sera ce que l'on nomme la pression au point A. Elle sera la même que la pression supportée par une portion quelconque de la paroi du vase, et rapportée à l'unité de surface.

§ 238. **Les gaz sont pesants.** — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que les molécules gazeuses n'étaient soumises qu'à leurs actions mutuelles : mais il n'en est jamais ainsi. Les gaz sont pesants, tout aussi bien que les liquides; et l'action de la pesanteur sur leurs molécules modifie les résultats que nous avons obtenus en n'en tenant pas compte.

Voyons d'abord comment on peut reconnaître qu'en effet les gaz sont pesants; car il n'est pas possible de s'en assurer de la même manière que pour les corps solides ou liquides : quand on abandonne une masse gazeuse à elle-même, on ne la voit pas tomber comme ces autres corps. L'expérience qui démontre que l'air, par exemple, est pesant, est bien simple. On prend un grand ballon de verre A (fig. 325), dont le col est garni d'une monture de cuivre munie d'un robinet B. Cette monture de cuivre porte en outre intérieurement un pas de vis, à l'aide duquel on peut fixer le ballon au centre de la platine d'une machine pneumatique comme le montre la figure 325. Lorsque le ballon n'est pas fixé de cette

manière, on peut adapter à sa monture de cuivre, à l'aide du même pas de vis, un petit crochet C, qui sert à le suspendre au-dessous du plateau d'une balance (fig. 326). Le robinet B étant ouvert, et par suite le ballon étant plein d'air, on visse le crochet C à la monture; puis, après avoir suspendu le tout au plateau de la balance, on établit l'équilibre en mettant des poids dans l'autre plateau. Cela fait, on dévisse le crochet C, on adapte le ballon à la machine pneumatique (fig. 325), et en maintenant toujours le robinet B ouvert, on fait agir cette machine. L'air sort du ballon en quantité de plus en plus grande, à mesure que la machine fonctionne. Lorsqu'il n'en reste plus que très-peu, on ferme le robinet B, on détache le ballon de la machine pneumatique, on lui adapte de nouveau le crochet C, et on le suspend comme précédemment au plateau de la balance. On voit alors que les poids qui avaient été mis dans le second plateau pour faire équilibre au ballon, lorsqu'il était plein d'air, se trouvent trop forts pour lui faire encore équilibre, après que l'air en a été retiré en grande partie. Pour rétablir l'équilibre, on est obligé de

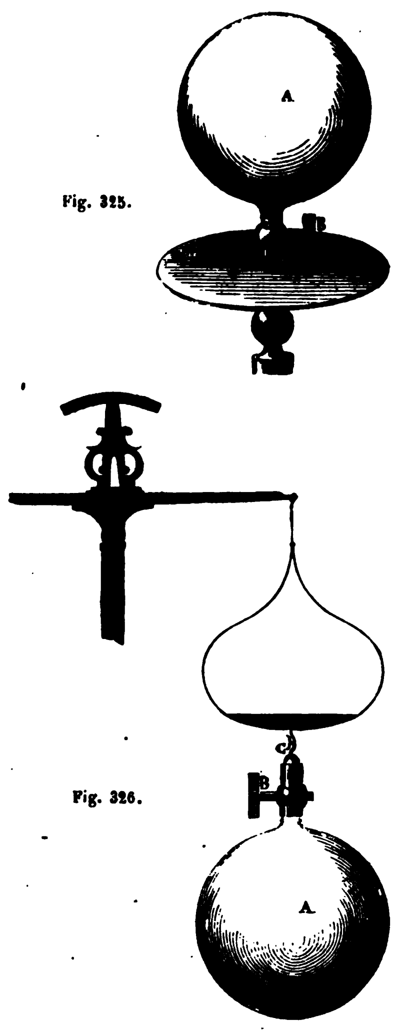


Fig. 325.

Fig. 326.

mettre un certain poids sur le plateau qui supporte le ballon: ce poids est évidemment le poids de l'air qu'on a fait sortir du ballon. L'air est donc pesant. Il en est de même de tous les autres gaz, pour lesquels on peut faire une expérience analogue, mais qui présente quelques difficultés de plus.

§ 239. **Pressions dans les gaz pesants.** — En appliquant aux gaz les raisonnements qui ont été faits sur les liquides pesants, dans les paragraphes 212 à 217, et tenant compte de la compressibilité et de l'élasticité des gaz, on arrivera aux résultats suivants.

1° Dans une masse gazeuse pesante en équilibre, les pressions supportées par de très-petites portions de plans, d'égale étendue, passant toutes par un même point A pris à l'intérieur du gaz, sont égales entre elles. La pression totale que supporterait l'unité de surface de chacun de ces plans, si cette surface était pressée partout comme elle l'est dans le voisinage du point A, constitue ce que l'on nomme la pression au point A.

2° Dans une masse gazeuse pesante en équilibre, la pression est la même pour tous les points situés sur un même plan horizontal.

3° La pression en un point d'une masse gazeuse pesante en équilibre est égale à la pression en un autre point situé plus haut que le premier, augmentée du poids du gaz que contiendrait un cylindre vertical, compris entre les plans horizontaux qui passent par ces deux points, et ayant pour base l'unité de surface.

4° La pression exercée par un gaz pesant en équilibre, en un point de la paroi du vase qui le contient, est égale à celle qu'il exerce en un autre point de cette paroi, situé plus haut que le premier augmentée du poids du gaz que contiendrait un cylindre vertical, compris entre les plans horizontaux qui passent par ces deux points, et ayant pour base l'unité de surface.

Le poids de l'unité de volume d'un gaz est tellement faible relativement aux pressions que ce gaz exerce habituellement, en vertu de sa force expansive contre les surfaces avec lesquelles il est en contact que la plupart du temps, quand on n'a pas à considérer une masse gazeuse très-étendue, on peut faire abstraction du poids de ses molécules. Alors le gaz rentre dans les conditions où nous l'avions supposé placé dans le § 237, et les résultats que nous avons énoncés dans ce paragraphe deviennent applicables.

§ 240. L'incompressibilité presque absolue des liquides permet de regarder les diverses parties d'une masse liquide pesante en

équilibre comme ayant la même densité. Il n'en est pas rigoureusement ainsi : puisque, les parties inférieures du liquide étant plus fortement pressées que les parties supérieures, les molécules doivent être plus rapprochées dans les premières que dans les dernières ; un même volume doit comprendre un plus grand nombre de molécules liquides, à mesure que ce volume est pris plus bas dans la masse liquide. Mais la différence est tellement faible, que l'on ne commet pas d'erreur sensible, en admettant que les molécules sont également éloignées les unes des autres dans toute l'étendue de la masse liquide, ou, en d'autres termes, que la densité est la même partout.

Il n'en est pas de même des gaz. Leur grande compressibilité fait que la plus légère différence de pression, entre deux points d'une masse gazeuse en équilibre, détermine une différence appréciable entre les densités du gaz en ces deux points : la densité est d'autant plus grande que la pression est plus forte. Aussi, dans une masse gazeuse pesante en équilibre, la densité va-t-elle constamment en croissant, depuis la partie supérieure jusqu'à la partie inférieure. La pression étant la même pour tous les points situés sur un même plan horizontal la densité doit également être la même pour ces divers points. Si l'on imagine que toute la masse gazeuse soit divisée en tranches, par un grand nombre de plans horizontaux, menés à une même distance très-petite les uns des autres, on pourra regarder la densité comme étant la même dans toute l'étendue de chacune de ces tranches; la densité ira au contraire en augmentant, quand on passera d'une tranche à une autre située au-dessous de la première. La masse gazeuse pourra ainsi être assimilée à un ensemble de densités différentes, qui se superposent dans un même vase, et qui sont séparées les unes des autres par des surfaces planes et horizontales.

Lorsqu'on dit (§ 239) que la différence des pressions en deux points d'une masse gazeuse pesante en équilibre est égale au poids du gaz que contiendrait un cylindre vertical compris entre les plans horizontaux qui passent par ces deux points, et ayant pour base l'unité de surface, on doit entendre que le gaz contenu dans ce cylindre soit pris tel qu'il est dans la masse gazeuse, entre les deux plans qui comprennent ce cylindre; sa densité doit décroître constamment de la base inférieure du cylindre à sa base supérieure. On ne peut donc pas avoir le poids d'un pareil cylindre de gaz, comme s'il s'agissait d'un liquide, en multipliant le poids de l'unité de volume du gaz par le volume du cylindre (§ 221). Mais quand il s'agit d'une différence de hauteur qui n'est pas bien grande, comme la densité du gaz ne varie pas

beaucoup dans cette hauteur, on peut évaluer le poids du cylindre gazeux, en admettant que la densité soit la même dans toute son étendue, et opérant comme s'il s'agissait d'un liquide ; l'erreur commise ainsi sera inappréciable dans la plupart des cas.

§ 241. Lorsqu'un gaz est contenu dans un vase fermé, et que l'on vient à augmenter les dimensions du vase, le gaz se dilate aussitôt, pour occuper la totalité de l'espace qui lui est offert. Jamais, dans aucune expérience, on n'a pu trouver de limite à cette dilatabilité. On trouve toujours qu'une petite quantité de gaz, quelque petite qu'elle soit, se répand dans toutes les parties de l'espace où elle est libre de se rendre, et cela quelque grand que soit cet espace. Il n'y a donc pas lieu de considérer la surface libre d'un gaz pesant ; dans aucun des cas que nous rencontrons dans nos expériences, un gaz ne se termine à une surface libre.

Il n'est cependant pas probable qu'il n'y ait pas de limite à cette propriété des gaz, de se dilater toujours lorsque rien ne s'y oppose. La force expansive d'un gaz résulte des actions répulsives qui existent entre ses molécules, actions répulsives qui doivent être attribuées à la chaleur, puisqu'elles augmentent et diminuent d'une manière très-sensible, lorsqu'on élève ou qu'on abaisse la température du gaz. A mesure que le gaz se dilate, que ses molécules s'éloignent les unes des autres, ces actions moléculaires décroissent ; et tout tend à prouver qu'elles disparaissent complétement, lorsque les molécules se trouvent à de grandes distances les unes des autres. Mais dès lors que les molécules ne seront plus soumises aux forces moléculaires, elles devront tendre à se rapprocher, en vertu de la gravitation universelle, à laquelle aucun des corps de la nature ne se soustrait. On conçoit par là qu'un gaz peut bien se dilater dans des limites très-étendues ; mais qu'il ne se dilatera pas indéfiniment, puisque ses molécules, étant suffisamment écartées les unes des autres, ne tendront pas à s'écarter davantage.

§ 242. **Atmosphère.** — L'air au milieu duquel nous vivons est un gaz qui se trouve répandu sur toute la surface de la terre. Quelle que soit la hauteur à laquelle on ait pu s'élever sur les montagnes, on y a toujours trouvé de l'air. La masse d'air qui environne la terre et qu'on nomme l'*atmosphère*, présente donc partout une grande épaisseur ; mais cette épaisseur n'est pas indéfinie. Il existe une limite que l'atmosphère ne peut pas dépasser et il nous sera facile, sinon de la faire connaître complétement, au moins d'en donner une idée. Concevons que nous prenions une molécule de l'atmosphère, qui soit située à une certaine hauteur

au-dessus de la surface de la terre, et dans le plan de l'équateur. Cette molécule sera soumise à deux forces, dont l'une sera l'attraction qu'elle éprouve de la part de la terre, et l'autre sera la force centrifuge qui résulte de son mouvement de rotation autour de la ligne des pôles; car l'atmosphère tout entière doit nécessairement tourner avec la terre, et avec la même vitesse angulaire. La première force tend à rapprocher la molécule de la surface de la terre; la seconde agit en sens contraire. Tant que la molécule que nous considérons ne sera pas prise très-loin de la surface de la terre, la première des deux forces l'emportera sur la seconde. Mais si nous prenons des molécules de plus en plus éloignées de cette surface, toujours dans le plan de l'équateur, la première force décroîtra, la seconde croîtra au contraire (fin du § 114); et nous arriverons à un point où ces deux forces étant égales se feront équilibre. L'atmosphère ne peut pas s'étendre, dans le plan de l'équateur, plus loin que le point dont nous venons de parler. Car, s'il en était ainsi, les molécules gazeuses qui seraient au delà de ce point seraient pour ainsi dire repoussées par l'excès de leur force centrifuge sur l'attraction qu'elles éprouveraient de la part de la terre; elles ne pourraient donc pas continuer à faire partie de l'atmosphère, et elles s'en détacheraient pour se répandre dans l'espace environnant. La limite que nous trouvons ainsi, au delà de laquelle l'atmosphère ne peut pas s'étendre dans le plan de l'équateur, se trouve à une distance d'environ 36 000 kilomètres de la surface de la terre.

L'atmosphère de la terre est bien loin d'occuper tout l'espace qui existe entre la surface du globe et la limite dont nous venons de reconnaître l'existence. Imaginons un cylindre qui s'élève verticalement à travers l'atmosphère, depuis la surface de la terre jusqu'à une très-grande hauteur, et examinons la masse d'air contenue à l'intérieur de ce cylindre. Chacune des diverses couches, dans lesquelles on peut concevoir que toute cette colonne d'air soit décomposée, a à supporter le poids de toutes les couches qui la surmontent. La pression à laquelle une couche est soumise est donc d'autant plus faible que cette couche est plus élevée; et, par suite, la densité de l'air décroît constamment à mesure qu'on monte dans l'atmosphère. En étudiant la manière dont la densité décroît dans les diverses couches que l'on a pu atteindre, soit en s'élevant sur les montagnes, soit dans les ascensions aérostatiques, on a été en mesure de reconnaître que, si l'on trouvait le moyen de se transporter à une hauteur de 48 kilomètres, on n'y rencontrerait plus qu'une quantité d'air insignifiante, dont la présence ne pourrait être constatée par

aucun des moyens dont nous disposons. Ainsi la hauteur de l'atmosphère ne dépasse pas 48 kilomètres. Cette hauteur paraît considérable : mais si on la compare aux dimensions de la terre, on voit qu'en réalité l'atmosphère n'est qu'une mince enveloppe gazeuse qui l'environne de toutes parts.

§ 243. **Pression atmosphérique.** — L'air a ıérique exerce une pression sur la surface de tout corps ıel il est en contact. Il résulte de ce qui précède que cett n. rapportée à l'unité de surface, est égale au poids con- tiendrait un cylindre vertical, ayant pour ba de surface, et s'étendant dans toute la hauteur re. Elle s'exerce d'ailleurs aussi bien sur les corps pl ıeur d'une chambre, que sur ceux qui sont en plein a ı existe toujours des communications de l'intérieur de l au dehors, par les cheminées, par les joints des porte tres, et la pression de l'atmosphère se transm intensité de l'extérieur à l'intérieur. Nous all ques expériences qui mettent en évidence la rique, et qui peuvent donner une idée de sa grandeur.

On prend un cylindre creux de verre (fig. 327), don couvre une des bases à l'aide d'une peau de vessie que l'on fixe solidement sur son contour. On place ce cylindre sur la platine d'une machine pneumatique, de manière à établir un contact intime entre la surface de cette platine et les bords de la seconde base du cylindre, qui ont été préalablement usés pour satisfaire à cette condition. Si alors on retire l'air de l'intérieur du cylindre de verre en faisant marcher la machine, on voit que la peau de vessie se déforme; de plane qu'elle était, elle devient concave. Avant qu'on ait placé le cylindre sur la machine pneumatique, la peau était également pressée, sur ses deux faces, par l'air atmosphérique qui s'étendait librement de l'une à l'autre. Mais, dès qu'on a retiré une partie de l'air qui était à l'intérieur du cylindre, l'air restant n'exerçant plus une aussi grande pression que précédemment sur la face inférieure de la peau, la pression supérieure n'est plus contre-balancée : la peau fléchit sous cette pression, qui, à mesure que le vide s'opère, approche de plus en plus d'être égale au poids de la colonne d'air, qui aurait pour base l'ouverture du cylindre, et qui s'élèverait jusqu'à la limite de l'atmosphère. Lorsque la peau est ainsi fortement tendue sous



Fig. 327.

le poids considérable qu'elle supporte, il suffit de la toucher légèrement avec un corps solide, pour qu'elle se déchire avec fracas, en laissant rentrer l'air dans l'espace où l'on avait fait le vide.

Une autre expérience consiste à rapprocher l'un de l'autre deux hémisphères creux de bronze (fig. 328), de manière à établir un contact intime entre leurs bords, et à faire le vide dans l'espace compris à leur intérieur. Pour cela, l'un des deux hémisphères est percé d'un conduit, dont l'extrémité est garnie intérieurement d'un filet de vis, à l'aide duquel on peut le fixer au centre de la platine d'une machine pneumatique. On manœuvre la machine ; l'air contenu à l'intérieur des deux hémisphères sort par le conduit ; et quand on juge que le vide est suffisamment opéré, on ferme un robinet adapté à ce conduit, afin d'empêcher que l'air ne rentre, quand on aura détaché les hémisphères de la machine pneumatique. Si alors on cherche à séparer les deux hémisphères l'un de l'autre, on éprouve une grande difficulté ; ils sont comme collés ensemble, et ce n'est qu'en leur appliquant un effort considérable qu'on peut parvenir à les disjoindre. Avant qu'on eût fait le vide, chaque hémisphère était également pressé par l'air, intérieurement et extérieurement. Mais quand le vide a été opéré, les pressions intérieures ayant disparu à peu près complétement, les pressions extérieures produisent tout leur effet ; elles appuient fortement les deux hémisphères l'un contre l'autre, et l'on ne peut les séparer qu'en exerçant sur chacun d'eux des forces de traction capables de vaincre ces pressions. Cette expérience a été imaginée par Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg, inventeur de la machine pneumatique; c'est pour cette raison que les deux hémisphères creux qui servent à la faire, portent le nom d'*hémisphères de Magdebourg*.



Fig. 328.



Fig. 329.

Nous indiquerons enfin une troisième expérience que tout le

monde peut répéter avec la plus grande facilité. On prend un verre à boire, qu'on remplit complétement d'eau; puis on le recouvre d'une feuille de papier, et on le retourne sens dessus dessous, en ayant soin de soutenir le papier avec le plat de la main, pendant ce mouvement, pour le maintenir en contact avec les bords du verre. Lorsque le verre est retourné, et que la feuille de papier est dans une position bien horizontale, on retire la main qui la soutenait : on voit alors le liquide se maintenir dans le verre, sans tomber (fig. 329), et la feuille de papier reste adhérente aux bords du verre, comme si elle y était collée. Si l'eau ne tombe pas, c'est que la pression atmosphérique la soutient, en agissant de bas en haut, sur la face inférieure de la feuille de papier. Cette feuille est nécessaire pour faire l'expérience; sans elle, la pression de l'air, qui ne s'exercerait jamais avec une parfaite régularité sur toute la surface inférieure de la masse d'eau, déterminerait une déformation de cette surface, et, tandis que l'air monterait d'un côté, l'eau tomberait de l'autre.

§ 244. **Baromètre.** — Supposons que l'on introduise une cloche de verre dans un baquet plein d'eau, en la couchant sur le côté, pour qu'elle se remplisse, et qu'il ne reste pas d'air à son intérieur; puis qu'on la retire en partie de l'eau, en la plaçant de manière que son ouverture, tournée vers le bas, reste tout entière au-dessous de la surface du liquide dans le baquet (fig. 330) : on verra que, dans cette nouvelle position, la cloche restera complétement pleine d'eau. Les anciens physiciens, qui regardaient ce fait comme étant en opposition avec le principe de l'équilibre d'un liquide dans des vases communiquants (§ 228), l'expliquaient en disant que la nature a *horreur du vide*. On voit, en effet, que la portion de la cloche qui est au-dessus de la surface de l'eau dans le baquet serait vide de matière, si l'eau s'y abaissait jusqu'au niveau de cette surface, puisque l'air ne pourrait nullement y pénétrer.



Fig. 330.

C'est la pression atmosphérique, s'exerçant sur la surface de l'eau dans le baquet, qui s'oppose à ce que l'eau de la cloche descende pour se mettre *de niveau* avec cette surface. S'il n'y avait

pas de pression appliquée à l'eau du baquet, le principe de l'équilibre d'un liquide dans des vases communiquants exigerait bien que le niveau de l'eau fût le même à l'intérieur et à l'extérieur de la cloche; mais la pression atmosphérique modifie ce résultat, en obligeant le liquide à monter, dans la cloche, au-dessus du niveau qu'il prendrait sans elle.

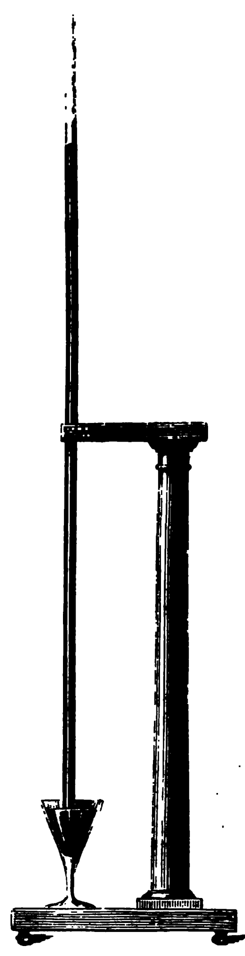


Fig. 331.

On conçoit cependant que la pression atmosphérique ne peut faire ainsi monter l'eau que jusqu'à une certaine hauteur. Si la cloche avait des dimensions verticales extrêmement grandes, l'eau ne se maintiendrait pas dans toute son étendue; elle s'abaisserait jusqu'à ce que la différence de niveau, à l'intérieur et à l'extérieur, fût en rapport avec la grandeur de la pression qui en est la cause. Si, au lieu de prendre de l'eau, on prend un liquide plus dense, la différence de niveau déterminée par l'action de la pression extérieure sera plus petite, et d'autant plus petite que la densité du liquide sera plus considérable. Aussi ce résultat peut-il être vérifié très-facilement à l'aide du mercure. Pour cela on prend un tube de verre droit, fermé par un bout, et ayant une longueur d'environ 90 centimètres; on le remplit complétement de mercure, puis, en mettant le doigt sur l'extrémité ouverte, on le renverse en plongeant cette même extrémité dans un vase contenant du mercure. Si alors on enlève le doigt qui empêchait le mercure du tube de communiquer avec celui du vase, et qu'on maintienne le tube verticalement, de manière que la plus grande partie de sa longueur se trouve au-dessus de la surface libre du mercure dans le vase, on reconnaît que le tube ne reste pas complétement rempli. Le liquide s'abaisse à son intérieur, en laissant un espace

vide au-dessus de lui, et il s'arrête au moment où la différ
de niveau dans le tube et dans le vase est d'environ 76 cent
tres (fig. 331).

§ 245. Cette expérience, faite pour la première fois par Torricelli, en 1643, va nous conduire à évaluer numériquement la pression atmosphérique. Si nous examinons en effet ce qui se passe à l'intérieur du mercure contenu dans le vase, nous verrons que les pressions doivent être les mêmes pour tous les points situés sur un même plan horizontal, soit à l'intérieur du tube, soit à l'extérieur, si le plan rencontre ce tube. Il en sera encore ains
le plan horizontal qui forme la surface libre du mercure d
vase : en sorte que la pression exercée en un de ses poi
l'atmosphère doit être égale à celle qui est exercée au
niveau, à l'intérieur du tube, par la colonne de mercure si
au-dessus de ce niveau. La pression que l'atmosphère exerc
1 centimètre carré de la surface libre du mercure dans
sera donc égale au poids d'un cylindre de mercure ayan
base 1 centimètre carré, et pour hauteur 76 centimètres.
lume de ce cylindre est de 76 centimètres cubes ; et con
centimètre cube de mercure pèse 13gr,6, il en résulte
pression exercée par l'atmosphère sur 1 centimètre car..
de 1 033 grammes, ou 1k,033.

Il est aisé de voir maintenant jusqu'à quelle hauteur l'eau serait maintenue par la pression atmosphérique, dans une expérience analogue à la précédente, dans laquelle on remplacerait le mercure par l'eau. Le cylindre d'eau dont le poids mesurerait dans ce cas la pression atmosphérique, devant peser autant que le cylindre de mercure dont nous venons de parler, les hauteurs de ces deux cylindres seront inversement proportionnelles aux densités des liquides qui leur correspondent : en sorte que la hauteur du cylindre d'eau sera égale à $0^m,76 \times 13,6$, ou bien égale à $10^m,33$. La différence de niveau de l'eau, à l'intérieur du tube et à l'extérieur, dans une expérience faite comme celle que nous venons d'indiquer, serait donc de $10^m,33$.

Si l'on répète l'expérience de Torricelli, à diverses époques et en divers lieux, et qu'on mesure bien exactement la hauteur de la colonne de mercure qui produit la même pression que l'atmosphère, on ne trouve pas toujours le même nombre ; la pression atmosphérique est donc variable d'un moment à un autre, et aussi d'un lieu à un autre lieu. Mais quand le lieu où se fait l'expérience n'est pas très-élevé au-dessus du niveau de la mer, la hauteur de la colonne de mercure n'est jamais très-différente de $0^m,76$. C'est cette hauteur de $0^m,76$ que l'on prend com

étant la pression normale ; c'est à elle que l'on compare toutes les autres, pour se faire une idée de leurs variations.

Toutes les fois qu'un gaz exerce, contre les parois qu'il touche, une pression égale à celle qu'exercerait une colonne de mercure de $0^m,76$ de hauteur, on dit que cette pression est d'*une atmosphère*. La pression est de 2, de 3, de 4,.... atmosphères, si elle équivaut à celle qui résulterait d'une colonne de mercure ayant une hauteur de 2 fois, 3 fois, 4 fois,.... $0^m,76$. Le mot *atmosphère* est employé, dans ce cas, pour désigner une pression que l'on prend pour terme de comparaison, et qui constitue ainsi une unité particulière, à l'aide de laquelle une pression quelconque pourra être évaluée en nombre. On devra se rappeler qu'une pareille pression d'une atmosphère est de $1^k,033$ par centimètre carré.

§ 246. L'appareil représenté par la figure 331, que l'on dispose en opérant comme nous l'avons dit, et qui fournit une mesure de la pression atmosphérique, se nomme un *baromètre*. On obtient encore un baromètre, en prenant un tube fermé par un bout et dont l'autre bout est recourbé (fig. 332); remplissant ce tube de mercure, puis le retournant, pour le placer comme l'indique la figure, l'extrémité fermée vers le haut. Aussitôt que le tube est retourné, on voit le mercure baisser dans la grande branche, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi entre la pression atmosphérique, qui s'exerce sur la surface libre du mercure dans la petite branche, et la pression due à la colonne de liquide située dans la grande branche, au-dessus de cette surface libre. Ce baromètre (fig. 332) est désigné sous le nom de *baromètre à siphon*, à cause de la forme du tube à sa partie inférieure ; celui de la figure 331 est un *baromètre à cuvette*.



Fig. 332.

Les changements qu'éprouve, d'un moment à un autre, la différence de niveau des surfaces libres du mercure dans un baromètre, se traduisent par un mouvement de chacune de ces deux surfaces. Lorsque cette différence de niveau, que l'on nomme la hauteur de la colonne barométrique, vient à augmenter, le mercure monte dans le tube, et baisse dans la cuvette, ou dans la petite branche ouverte qui la remplace dans le baromètre à siphon ; si la hauteur de la colonne barométrique diminue, le mercure descend dans le tube, et monte dans la cuvette. La somme des deux déplacements que prennent ainsi en sens contraire les deux surfaces libres du mercure est égale

à la quantité dont la hauteur de la colonne barométrique augmente ou diminue; mais ces déplacements peuvent être très-différents l'un de l'autre, suivant que les deux surfaces libres auront des étendues plus ou moins grandes, l'une par rapport à l'autre. Supposons que le tube barométrique soit peu large dans l'endroit où se trouve l'extrémité supérieure de la colonne de mercure, et qu'au contraire la cuvette permette à la surface libre du liquide qu'elle contient d'occuper une assez grande étendue; un abaissement du mercure dans le tube ne fera passer dans la cuvette qu'une petite quantité de liquide qui, se répartissant sur une étendue horizontale assez grande, ne fera monter la surface libre dans la cuvette que d'une hauteur insignifiante. Si les deux surfaces libres, dans le tube et dans la cuvette, sont d'égale étendue, l'une d'elles baissera autant que l'autre montera. Si enfin la surface libre était beaucoup plus grande dans le tube que dans la cuvette, un abaissement du niveau du mercure dans le tube déterminerait une élévation beaucoup plus grande dans la cuvette.



Fig. 333.

Les variations qu'éprouve la hauteur de la colonne barométrique ayant un certain rapport avec les changements de temps, on a fait du baromètre un instrument destiné à indiquer si le temps se dispose à devenir beau ou mauvais. Dans ce but, on emploie habituellement le baromètre à siphon (fig. 332), et l'on donne à la petite branche ouverte, qui joue le rôle de cuvette, un diamètre plus grand que celui du tube. De cette manière les changements de grandeur de la colonne barométrique donnent lieu à des déplacements très-appréciables de la *surface libre* dans le tube; et cette surface,

faisant fonction d'index, vient ainsi correspondre aux diverses indications que l'on a marquées d'avance à côté du tube.

Pour rendre plus visible la variation qu'éprouve la hauteur de la colonne barométrique, on a imaginé le *baromètre à cadran*, dans lequel les changements de niveau du mercure dans la petite branche ouverte donnent lieu au mouvement d'une aiguille sur un cadran (fig. 333 et 334). Voici quelle est la disposition de cet appareil. Une poulie à double gorge est fixée à un petit axe horizontal avec lequel elle peut tourner très-facilement. Deux petits cylindres d'ivoire sont suspendus aux extrémités de deux fils, dont chacun est attaché en un point de l'une des deux gorges de la poulie; ces deux fils, enroulés en sens contraire l'un de l'autre dans les deux gorges, descendent ensuite verticalement, et sont tendus par les poids des deux cylindres d'ivoire. Un de ces deux cylindres, plus lourd que l'autre, pénètre à l'intérieur de la petite branche du baromètre, et vient reposer sur la surface du mercure qui y est soutenu. Si le mercure s'abaisse dans la petite branche, par suite d'une augmentation de la hauteur barométrique, le petit cylindre d'ivoire qui se trouve dans cette branche n'étant plus soutenu par le liquide, s'abaisse également en faisant tourner la poulie, et faisant en même temps monter l'autre cylindre d'ivoire. Mais si le mercure monte dans la petite branche, il soulève le cylindre d'ivoire qui le surmonte, l'autre cylindre descend, et la poulie tourne en sens contraire. Une aiguille, fixée à l'extrémité de l'axe de la poulie, se meut avec elle, et vient correspondre successivement aux diverses indications que porte un cadran concentrique avec la poulie. L'aiguille doit être construite de manière à avoir son centre de gravité sur l'axe de la poulie, afin que son poids ne tende pas à faire tourner cet axe dans un sens plutôt que dans un autre.



Fig. 334.

§ 247. D'après les notions générales que nous avons données précédemment sur l'atmosphère de la terre (§ 242), il est bien évident que, si l'on transporte un baromètre en des points de plus en plus élevés dans cette atmosphère, la hauteur de la colonne barométrique devra diminuer, en raison de la diminution progressive des pressions. L'expérience en a été faite pour la première fois, à l'instigation de Pascal, en 1648: un baromètre ayant été transporté du pied au sommet du Puy-de-Dôme, la hauteur de la colonne barométrique a éprouvé une diminution de 84 millimètres. Le raccourcissement de la colonne barom-

trique étant d'autant plus grand que la hauteur à laquelle on s'est élevé est plus considérable, on conçoit que l'observation du baromètre, faite en divers points, puisse faire connaître les différences de niveau de ces points. C'est ce qui arrive en effet ; et c'est sur ces considérations qu'est basée la mesure de la hauteur des montagnes par le baromètre.

Dans les circonstances ordinaires de température et de pression atmosphérique, au niveau de la mer, l'air pèse environ 770 fois moins que l'eau, et par conséquent 10 472 fois moins que le mercure, à égalité de volume. D'après cela, si l'on s'élève verticalement de $10^m,472$, la pression atmosphérique devant diminuer du poids d'une colonne d'air de $10^m,472$ de hauteur, la colonne barométrique diminue d'une quantité 10 472 fois plus petite, c'est-à-dire d'un millimètre. Une élévation verticale de 1^m seulement donnera lieu à une diminution d'environ un dixième de millimètre dans la colonne de mercure, quantité qui est appréciable. Si l'air avait la même densité à toutes les hauteurs, rien ne serait plus simple que de mesurer la différence de niveau de deux points à l'aide du baromètre : en supposant que la densité de l'air fût celle qui vient d'être indiquée, on n'aurait qu'à multiplier 10 472 par le nombre de millimètres dont la colonne barométrique aurait diminué en passant du premier point au second. Mais il n'en est pas ainsi. La densité de l'air décroît progressivement, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère ; et pour trouver une même diminution de pression barométrique, il faut monter de quantités de plus en plus grandes, à mesure qu'on est déjà plus élevé au-dessus du niveau de la mer. Une dépression d'un dixième de millimètre dans la colonne de mercure, qui correspond à une élévation d'environ 1^m dans l'atmosphère, au niveau de la mer, ne correspond plus bientôt qu'à une élévation de 2^m, de 3^m, de 4^m... De plus, la température variant d'une couche d'air à une autre couche, les densités de ces couches ne sont pas les mêmes que si la température était uniforme dans toute l'atmosphère. D'autres circonstances encore viennent compliquer la question. Cependant on est parvenu à construire des tables d'un usage commode, à l'aide desquelles on détermine assez exactement la différence de niveau de deux points, par des observations de pressions barométriques et de températures, faites en ces deux points. Ces tables sont publiées tous les ans dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes*.

§ 248. Le baromètre a besoin d'être disposé d'une manière spéciale, pour se prêter à l'usage que nous venons d'indiquer ; il faut qu'il *soit facile à transporter*, et qu'il permette de déter-

miner bien exactement la différence de niveau des deux surfaces libres du mercure. Voici quelle est la disposition du baromètre de Fortin, qui a été construit de manière à satisfaire à ces deux conditions.

Ce baromètre peut être suspendu à la partie supérieure d'un pied à trois branches (fig. 335) ; on le met dans cette position, quand on veut faire une observation. Lorsque les trois branches du pied sont rapprochées, de manière à se toucher, elles laissent à leur intérieur un espace vide dans lequel le baromètre peut être logé ; en sorte que le pied, étant fermé, forme une sorte de fourneau destiné à garantir l'instrument pendant le voyage.

Le baromètre de Fortin est à cuvette. Ainsi que nous l'avons dit, lorsque le niveau du mercure monte ou descend dans le tube, il descend ou monte en même temps dans la cuvette ; et pour avoir une mesure exacte du changement qu'a éprouvé la hauteur de la colonne barométrique, il faut tenir compte à la fois de ces deux changements simultanés de niveau. Mais ici le fond de la cuvette est mobile ; il est formé d'une membrane dont le milieu est appuyé sur l'extrémité d'une vis a (fig. 336). En faisant tourner cette vis, dans un sens ou dans l'autre on fait varier la position du fond de la cuvette, et par suite



Fig. 335.

Fig. 336.

aucun des moyens dont nous disposons. Ainsi la hauteur de l'atmosphère ne dépasse pas 48 kilomètres. Cette hauteur paraît considérable : mais si on la compare aux dimensions de la terre, on voit qu'en réalité l'atmosphère n'est qu'une mince enveloppe gazeuse qui l'environne de toutes parts.

§ 243. **Pression atmosphérique.** — L'air atmosphérique exerce une pression sur la surface de tout corps avec lequel il est en contact. Il résulte de ce qui précède que cette pression, rapportée à l'unité de surface, est égale au poids de l'air que contiendrait un cylindre vertical, ayant pour base cette unité de surface, et s'étendant dans toute la hauteur de l'atmosphère. Elle s'exerce d'ailleurs aussi bien sur les corps placés à l'intérieur d'une chambre, que sur ceux qui sont en plein air : car il existe toujours des communications de l'intérieur de la chambre au dehors, par les cheminées, par les joints des portes et des fenêtres, et la pression de l'atmosphère se transmet avec toute son intensité de l'extérieur à l'intérieur. Nous allons indiquer quelques expériences qui mettent en évidence la pression atmosphérique, et qui peuvent donner une idée de sa grandeur.

On prend un cylindre creux de verre (fig. 327), dont on recouvre une des bases à l'aide d'une peau de vessie que l'on fixe solidement sur son contour. On place ce cylindre sur la platine d'une machine pneumatique, de manière à établir un contact intime entre la surface de cette platine et les bords de la seconde base du cylindre, qui ont été préalablement usés pour satisfaire à cette condition. Si alors on retire l'air de l'intérieur du cylindre de verre en faisant marcher la machine, on voit que la peau de vessie se déforme; de plane qu'elle était, elle devient concave. Avant qu'on ait placé le cylindre sur la machine pneumatique, la peau était également pressée, sur ses deux faces, par l'air atmosphérique qui s'étendait librement de l'une à l'autre. Mais, dès qu'on a retiré une partie de l'air qui était à l'intérieur du cylindre, l'air restant n'exerçant plus une aussi grande pression que précédemment sur la face inférieure de la peau, la pression supérieure n'est plus contre-balancée : la peau fléchit sous cette pression, qui, à mesure que le vide s'opère, approche de plus en plus d'être égale au poids de la colonne d'air, qui aurait pour base l'ouverture du cylindre, et qui s'élèverait jusqu'à la limite de l'atmosphère. Lorsque *la peau* est ainsi fortement tendue sous

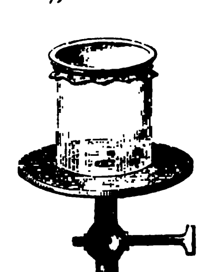


Fig. 327.

tion perpendiculaire au premier. A l'aide de ces deux axes de suspension, le baromètre peut prendre telle direction que l'on veut lui donner; et cédant à l'action de son poids, il se place verticalement, comme un fil à plomb. Les petites tiges de fer, *f*, *f* (fig. 335), qui sont accrochées aux trois branches du pied, de manière à les réunir deux à deux, sont destinées à maintenir ces branches dans des positions relatives invariables, pendant qu'on fait l'observation, et à prévenir ainsi les inconvénients qui pourraient résulter d'un dérangement brusque et accidentel de l'une des branches.

Le baromètre de Gay-Lussac est destiné à atteindre le même but que celui de Fortin. C'est un baromètre à siphon, dans lequel les deux surfaces libres du mercure, ayant la même étendue, se déplacent en même temps de quantités égales, en sens contraires; on a donc besoin de tenir compte des changements de niveau dans les deux branches du baromètre, afin d'en déduire la variation totale de la colonne barométrique. Des dispositions particulières, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas, permettent d'ailleurs de transporter très-facilement l'instrument, sans qu'il se dérange.

§ 249. **Loi de Mariotte.** — Lorsque l'on comprime un gaz, sa force élastique augmente; les pressions qu'il exerce sur les diverses portions de la paroi qui l'enveloppe croissent à mesure que son volume diminue. Mariotte, en étudiant les changements correspondants de pression et de volume, a reconnu l'existence de la loi suivante, qui porte son nom: *La force élastique d'une masse de gaz, dont la température reste la même, varie en raison inverse du volume qu'elle occupe.* La condition que la température de la masse de gaz que l'on considère reste la même, est essentielle, et ne doit pas être passée sous silence. On observe en effet que, lorsqu'on diminue brusquement le volume d'une masse gazeuse, sa température s'élève ; lorsqu'au contraire on permet à cette masse gazeuse de se dilater, sa température s'abaisse. Pour que les forces élastiques que prendra successivement une masse gazeuse, dont on fera varier le volume, satisfassent à la loi de Mariotte, il est donc nécessaire que ces forces élastiques ne soient mesurées qu'après que le gaz aura eu le temps de reprendre la température qu'il avait d'abord, en se mettant en équilibre de température avec les corps qui l'environnent.

La loi de Mariotte se vérifie facilement de la manière suivante. On prend un tube recourbé (fig. 338), dont la petite branche est fermée par le haut, tandis que la grande branche est ouverte, et l'on introduit, vers la partie inférieure de ce tube, une petite quantité de mercure, que l'on dispose de telle manière qu'il s'élève

dans les deux branches à un même niveau *ab*. La masse d'air, se trouve ainsi enfermée dans la petite branche, supporte la m pression que l'air extérieur ; car le mercure ne peut être en libre dans la position indiquée, qu'autant qu'il est soumis pressions égales sur ses deux surfaces libres. Si l'on vient alors à verser du mercure dans la grande branche, l'équilibre est troublé ; le mercure monte dans la petite branche, en comprimant l'air qu'elle contient, mais il monte beaucoup plus dans la grande. Il s'établit ainsi un nouvel équilibre ; et comme le mercure doit être également pressé, dans les deux branches, sur le plan horizontal *cd* qui passe par la plus basse de ses deux surfaces libres, il en résulte que la pression exercée par l'air qui est renfermé dans la petite branche est égale à la pression de l'air extérieur qui s'exerce librement dans la grande branche, augmentée de la pression due à la colonne de mercure qui existe dans cette branche au-dessus du plan horizontal *cd*. En comparant le nouveau volume occupé par la masse d'air qui est emprisonnée dans la petite branche, avec le volume qu'elle occupait sous la pression atmosphérique, on trouve que ces deux volumes sont en raison inverse des pressions correspondantes. Ainsi, lorsque le mercure s'est élevé de manière à réduire ce volume d'air de moitié, ce qu'on reconnaît à l'aide des divisions tracées à côté de la petite branche, la différence de niveau du mercure dans les deux branches est égale à la hauteur de la colonne barométrique ; le gaz supporte donc une pression double de la pression atmosphérique. Lorsque le volume de la masse d'air n'avait été réduit qu'aux deux tiers de ce qu'il était primitivement, la différence de niveau du mercure dans les deux branches était égale à la moitié de la hauteur de la colonne barométrique ; le gaz supportait alors une pression égale à une fois et demie la pression atmosphérique.



Fig. 338.

Des expériences nombreuses ont été faites dans le but de vérifier

l'exactitude de la loi de Mariotte, pour l'air atmosphérique et pour divers autres gaz. Les plus récentes, et en même temps les plus précises, sont celles de M. Regnault. Ces expériences, dans lesquelles les pressions ont été poussées jusqu'à 28 atmosphères, ont fait voir que la loi de Mariotte n'est pas rigoureusement exacte; elle est surtout inexacte pour des pressions qui approchent de celles pour lesquelles les gaz soumis à l'expérience passent à l'état de liquides. Mais les différences qui existent entre les volumes que prend successivement une même masse de gaz soumise à diverses pressions, et les volumes qu'elle devrait prendre d'après la loi de Mariotte, sont tellement petites, qu'on peut regarder cette loi comme exacte, sans qu'il en résulte d'erreurs appréciables dans les applications à la mécanique pratique.

§ 250. **Dilatation des gaz. — Loi de Gay-Lussac.** — Lorsque l'on fait varier la température d'une masse gazeuse, il se produit des effets différents, suivant les circonstances dans lesquelles le gaz se trouve placé. S'il est libre d'augmenter ou de diminuer de volume, sans que la pression qu'il supporte de la part de ses parois varie, une élévation de température le dilatera; un abaissement de température le contractera; le changement de température déterminera un changement de volume, sans changement de force élastique. Si, au contraire. le gaz est contenu dans une enveloppe fermée non susceptible de changer de grandeur, une élévation de température augmentera sa force élastique, et un abaissement la diminuera.

Ce second résultat est une conséquence du premier. On voit en effet que, lorsqu'une masse de gaz passe d'une température à une autre plus élevée, sans changer de volume, on peut concevoir qu'elle se soit d'abord dilatée par l'effet de la chaleur, sans que sa force élastique ait varié ; puis qu'elle ait été ramenée à son volume primitif, en conservant la nouvelle température qui lui avait été donnée, ce qui entraîne une augmentation de force élastique. La loi de Mariotte nous indique que, dans cette partie de l'opération, la force élastique du gaz s'accroît dans le rapport de son volume réduit au volume qu'il avait avant d'éprouver cette contraction ; ou bien encore dans le rapport du volume primitif de la masse gazeuse, au volume que lui a donné l'élévation de sa température lorsque sa force élastique ne changeait pas. On peut donc en conclure que, si par l'effet d'une même élévation de température, une masse gazeuse se dilate sans changer de pression, ou bien augmente de force élastique sans changer de volume, son volume s'accroît, dans le premier cas, dans *le même* rapport que sa force élastique dans le second : si, dans

le premier cas, le volume du gaz augmente de la moitié, du tiers, du quart,... de ce qu'il était d'abord, dans le second cas la force élastique augmentera de la moitié, du tiers, du quart,... de sa valeur primitive.

En étudiant la dilatation des gaz, sous pression constante, Gay-Lussac a trouvé qu'à égalité de changement de température, cette dilatation était la même pour tous les gaz, qu'elle ne dépendait pas de leur nature. C'est en cela que consiste la *loi de Gay-Lussac.*

M. Regnault, ayant fait des expériences nombreuses et très-précises sur la dilatation des gaz, a reconnu que la loi de Gay-Lussac n'était pas rigoureusement exacte. Tous les gaz ne se dilatent pas de la même quantité, pour un même accroissement de température. Mais nous pouvons répéter, pour la loi de Gay-Lussac, ce que nous avons dit de la loi de Mariotte : en la regardant comme exacte, il n'en résultera aucune erreur appréciable dans les applications à la mécanique pratique.

D'après les expériences de M. Regnault, lorsque la température d'une masse d'air augmente d'un degré, sans que sa force élastique change, son volume s'accroît des $\frac{11}{3000}$ de ce qu'il était à la température de 0°, ou de la glace fondante. Nous regarderons ce résultat comme s'appliquant à toute espèce de gaz, en raison de ce que nous venons de dire. Si, par exemple, le gaz que l'on considère avait un volume de 3 000 litres à la température 0°, son volume serait de 3 011 litres à la température de 1°, de 3 022 litres à la température de 2°, de 3 110 litres à la température de 10°, de 4 100 litres à la température de 100°. Il résulte de là que, si la température d'un gaz augmente d'un degré, sans que son volume change, sa force élastique s'accroît des $\frac{11}{3000}$ de ce qu'elle était à la température de 0° ; cette force élastique s'accroîtra du double, du triple,... de cette quantité, si la température augmente de 2°, de 3°, etc.

§ 251. **Influence de la pression atmosphérique sur les résultats relatifs à l'équilibre des liquides.** — Dans tout ce que nous avons dit précédemment (§§ 219 à 236), pour les liquides terminés par des surfaces libres, nous avons supposé qu'aucune pression ne s'exerçait sur ces surfaces. Les résultats auxquels nous sommes arrivés ne sont donc pas applicables aux liquides, tels qu'ils se présentent habituellement à nous, puisque les surfaces libres de ces liquides sont ordinairement soumises à la pression atmosphérique. Nous allons passer en revue ces divers résultats, afin de faire connaître ceux qui restent exacts, et d'indiquer les modifications qui doivent être apportées aux autres,

en raison des pressions que l'atmosphère exerce sur les surfaces libres des liquides.

1° Si un liquide pesant est en équilibre dans un vase, et que sa surface libre ne soit soumise à aucune pression, cette surface est plane et horizontale (§ 219). L'atmosphère venant à presser également sur les divers points de cette surface libre, l'équilibre ne sera évidemment pas troublé : donc la surface libre d'un liquide pesant en équilibre est plane et horizontale, lors même que cette surface est soumise à la pression atmosphérique.

2° Dans le cas où la surface libre d'un liquide pesant en équilibre est soumise à la pression atmosphérique, la pression en un point de la masse liquide, ou en un point de la paroi du vase qui le contient, n'est plus égale seulement au poids d'un cylindre du liquide, qui aurait pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance verticale de ce point à la surface libre (§ 221) ; elle est égale à ce poids, augmenté de la pression que l'atmosphère exerce sur l'unité de surface.

3° Si l'on veut déterminer la pression supportée par une surface d'une certaine étendue, contre laquelle un liquide pesant vient s'appuyer, ainsi que nous l'avons fait dans le § 223, on devra tenir compte de la pression atmosphérique, qui s'exerce sur la surface libre du liquide, et qui se transmet, sans changer de grandeur, à la paroi que l'on considère, pour s'ajouter à la pression qui résulte du poids du liquide. La pression totale sera ainsi augmentée, et le centre de pression n'occupera plus la même place que dans le cas où la surface libre du liquide n'éprouvait aucune pression. Mais supposons que l'on veuille déterminer la pression totale supportée par la paroi, ainsi que le centre de pression, afin de savoir quelle force on doit appliquer à cette paroi, et en quel point on doit l'appliquer, pour empêcher la paroi de céder à l'action du liquide ; on devra alors raisonner comme si la pression atmosphérique n'existait pas, et le résultat auquel on sera conduit sera bien celui qu'on cherche. Car si la pression atmosphérique, agissant sur la surface libre du liquide, se transmet, sans changer de grandeur, à la portion de paroi que l'on considère, d'une autre part elle agit avec la même intensité sur la face opposée de cette portion de paroi. Ces deux pressions égales et contraires se détruisent donc mutuellement, et les choses se passent de la même manière que si l'atmosphère n'exerçait aucune pression ni d'un côté ni de l'autre. Ainsi, ce que nous avons trouvé relativement à la pression supportée par une paroi rectangulaire (§ 223) est encore exact, en tant que la recherche avait pour objet de trouver la grandeur et le point d'application de la force

qui devait être appliquée à cette paroi, pour vaincre la poussée du liquide.

4° Des remarques analogues doivent être faites relativement à ce que nous avons dit dans les paragraphes 224 à 229. Les pressions dont nous avons parlé doivent être prises pour les pressions dues à la présence du liquide, pressions qui s'ajoutent à celles qui proviennent de la pression atmosphérique.

5° Lorsque la pression atmosphérique s'exerce sur les surfa
libres d'un liquide pesant contenu dans des vases commu
l'équilibre ne peut encore avoir lieu qu'autant que ce
libres sont sur un même plan horizontal (§ 228). On
effet, que la pression en A (fig. 308, p. 342), est égale à
sion atmosphérique qui s'exerce en C, augmentée du po
cylindre du liquide ayant pour base l'unité de surface,
hauteur AC ; et que, de même, la pression en B est égale
sion atmosphérique qui s'exerce en M, augmentée du
liquide que contiendraient cinq cylindres, ayant tous p
l'unité de surface, et dont les hauteurs seraient BD, EF
LM. Donc, pour que les pressions en A et en B soient
faut que la hauteur AC soit égale à la somme des haut
EF, GH, IK, LM ; ou bien, en d'autres termes, que les poi
M soient situés sur un même plan horizontal.

6° Lorsque deux vases communiquants contiendront deu
des de différentes densités, et que leurs surfaces libres seront soumises à la pression atmosphérique, on trouvera encore, comme dans le paragraphe 229, que les hauteurs de ces surfaces libres au-dessus du plan horizontal qui passe par leur surface de séparation, doivent être inversement proportionnelles aux densités des deux liquides.

7° Enfin, dans tout ce que nous avons dit relativement à la surface libre d'un liquide soumis à des forces quelconques, et aussi relativement aux phénomènes capillaires, la pression atmosphérique n'apporte aucune modification aux divers résultats auxquels nous avons été conduits. En effet, cette pression s'exerce toujours, en chaque point de la surface libre d'un liquide, suivant une direction perpendiculaire à cette surface. Si nous composons la pression que l'atmosphère exerce sur une molécule de la surface, avec la résultante des actions moléculaires auxquelles elle est soumise, nous trouverons une résultante totale, sur laquelle nous pourrons raisonner comme nous l'avons fait pour la résultante des actions moléculaires (§§ 230 et 234). Cette résultante totale sera perpendiculaire ou oblique à la surface libre du liquide, suivant que la résultante des actions moléculaires sera

elle-même perpendiculaire ou oblique à cette surface ; et comme c'est seulement sur la direction de cette résultante que sont fondés les raisonnements que nous avons faits, il s'ensuit que nous arriverons aux mêmes conséquences, soit que la pression atmosphérique agisse soit qu'elle n'agisse pas.

§ 252. **Vases communiquants, avec pressions inégales sur les surfaces libres.** — Lorsqu'un liquide est en équilibre dans des vases communiquants, et que ses surfaces libres ne sont soumises à aucune pression, ou bien qu'elles supportent la pression atmosphérique agissant également dans tous leurs points, ces surfaces libres doivent être à un même niveau (§§ 228 et 251). Mais il n'en est plus de même dans le cas où les surfaces libres du liquide, dans les vases communiquants, sont en contact avec des gaz dont les forces élastiques sont différentes ; les pressions exercées par ces gaz, sur les surfaces libres du liquide, étant inégales, il en résulte que ces surfaces ne peuvent plus se maintenir au même niveau. La surface la plus pressée s'abaissera au-dessous de l'autre.

Nous en avons déjà eu un exemple dans l'appareil qui nous a servi à vérifier l'exactitude de la loi de Mariotte (fig. 338, p. 373). Après avoir versé du mercure dans la grande branche, de manière à comprimer l'air contenu dans la petite branche, nous avons observé que les surfaces libres du mercure devaient se trouver à des hauteurs différentes, et que la différence de hauteurs de ces surfaces correspondait à la différence des pressions supportées, par elles, de la part de l'atmosphère, et de l'air emprisonné dans la petite branche. Il suffit de répéter le raisonnement que nous avons fait alors, pour en conclure en général que *la différence de niveau des surfaces libres d'un liquide dans deux vases communiquants, est égale à la hauteur d'un cylindre du liquide considéré qui aurait pour base l'unité de surface, et dont le poids serait égal à la différence des pressions exercées sur ces deux surfaces libres, et rapportées à l'unité de surface.*

Si la pression est de 100 grammes par centimètre carré sur l'une des surfaces libres du liquide de 250 grammes par centimètre carré sur l'autre surface, et que le liquide soit de l'eau, la différence de niveau de ces deux surfaces sera de $1^{m},50$; parce qu'un cylindre d'eau, dont la base est d'un centimètre carré, doit avoir une hauteur de $1^{m},50$ pour que son poids soit de 150 grammes. Si, le liquide étant toujours de l'eau, les pressions sur ses deux surfaces libres sont, d'une part de $\frac{1}{2}$ atmosphère, et d'une autre part de 3 atmosphères, la première surface se trouvera à $25^{m},82$ au-dessus de la seconde ; car, pour que le poids d'un cylindre d'eau,

ayant pour base un centimètre carré, pèse deux fois et demie $1^k,033$ (§ 245), ou bien $2^k,582$, il faut qu'il ait une hauteur de $25^m,82$.

§ 253. Supposons qu'on introduise l'une des extrémités d'un tube de verre dans un vase qui contient de l'eau, puis qu'appliquant la bouche à l'autre extrémité du tube, on aspire l'air qui y est contenu ; on voit aussitôt l'eau monter dans le tube, et monter d'autant plus haut qu'on aura aspiré plus fortement. Ce phénomène est une conséquence du principe énoncé dans le paragraphe qui précède. Lorsqu'on applique la bouche à l'extrémité du tube, de manière à intercepter toute communication de l'intérieur de ce tube avec l'extérieur, l'air qui y est contenu communique librement avec celui qui existe dans la bouche et dans les poumons, et forme avec lui une masse d'air isolée, contenue dans une enveloppe iée de toutes parts. L'aspiration consiste dans une dilatation es-pace occupé par les poumons. Cette dilatation produisant une mentation de capacité de l'enveloppe qui renferme notre m d'air, et cet air se répandant dans la totalité de l'espace qui est offert, il en résulte une diminution correspondante force élastique. La pression que l'air du tube e face de l'eau avec laquelle il est en contact, devie ble qu'elle n'était précédemment, c'est-à-dire plu a pression atmosphérique ; et comme cette dernière pressi it toujours avec la même intensité à l'extrémité du tube, il s'ensuit que la surface libre de l'eau est moins pressée dans le tube que dehors. C'est ce qui détermine une élévation du liquide à l'intérieur du tube, élévation qui sera d'autant plus prononcée, que la différence des pressions sur les surfaces libres sera plus grande, c'est-à-dire que l'aspiration sera plus forte.

L'aspiration, produite avec la bouche, ne peut jamais faire monter l'eau bien haut dans le tube. Mais si, au lieu de cela, on mettait le tube, supposé très-long, en communication avec une machine pneumatique, de manière à enretirer progressivement des portions de plus en plus grandes de l'air qu'il contient, on verrait l'eau s'élever de plus en plus. Il faut observer cependant que l'ascension de l'eau, produite ainsi par aspiration, ne peut pas dépasser une certaine limite. La différence des pressions sur les surfaces libres du liquide, à l'intérieur et à l'extérieur du tube, ne peut jamais surpasser la pression atmosphérique, puisque la plus grande de ces deux pressions est la pression atmosphérique elle-même. La différence de niveau de l'eau, occasionnée par cette différence des pressions, ne peut donc pas être plus grande que la hauteur d'une colonne d'eau capable de faire équilibre à la pression atmosphé-

rique, telle qu'elle a lieu au moment de l'expérience. Si, à ce moment, la colonne barométrique a une hauteur de 0m,76, l'eau ne pourra pas s'élever dans le tube à plus de 10m,33 au-dessus du niveau extérieur. Si l'expérience se faisait sur une haute montagne, où la hauteur de la colonne barométrique fût beaucoup moindre, la limite que ne pourrait pas dépasser l'élévation de l'eau par aspiration serait de beaucoup inférieure à 10m, 33.

§ 254. Si, au lieu d'aspirer l'air qui est en contact avec l'une des surfaces libres d'une masse d'eau contenue dans des vases communiquants, on augmente la force élastique de cet air, en le comprimant d'une manière quelconque, on déterminera une dénivellation en sens contraire; la surface libre, soumise ainsi à une pression plus forte que précédemment, s'abaissera, et l'autre s'élèvera d'une quantité correspondante. Si, par exemple, une caisse fermée A (fig. 339), contient de l'eau qui peut passer librement dans le tuyau B, adapté à la caisse près de son fond, les surfaces de l'eau dans la caisse et dans le tuyau se trouveront au même niveau, tant que les pressions supportées par ces surfaces seront égales. Mais si, la pression atmosphérique s'exerçant librement sur l'eau du tuyau B, on introduit dans la caisse A, par le tuyau C, des quantités d'air de plus en plus grandes, par les moyens dont nous parlerons plus tard, la force élastique de cet air croîtra constamment; la pression qu'il exercera sur l'eau de la caisse deviendra de plus en plus grande, et l'eau s'élèvera de plus en plus dans le tuyau B. La différence de niveau de l'eau, dans le tuyau et dans la caisse, est ici déterminée par la différence entre la pression de l'air en A et la pression atmosphérique qui agit en B; et comme la première de ces deux pressions peut croître indéfiniment, il en résulte que la hauteur à laquelle l'eau pourra s'élever ainsi dans le tuyau B est également indéfinie. La hauteur de la surface de l'eau dans le tuyau B, au-dessus de la surface de l'eau dans la caisse A, sera égale à autant de fois 10m,33 que l'excès de la pression de l'air en A sur la pression atmosphérique contiendra d'atmosphères (§ 245).

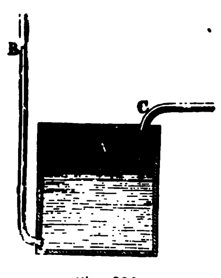


Fig. 339.

Il est très-important d'observer la différence essentielle qui existe entre l'élévation de l'eau par aspiration, et l'élévation par compression. Dans le premier cas, l'eau ne peut pas s'élever à une hauteur plus grande que celle d'une colonne d'eau qui ferait

équilibre à la pression atmosphérique; tandis que, dans le second cas, elle peut s'élever à une hauteur aussi grande qu'on veut.

§ 255. **Moyen d'obtenir un niveau constant pour un liquide contenu dans un vase.** — Supposons qu'on veuille entretenir à une hauteur constante le niveau d'un liquide contenu dans un vase, niveau qui tend à baisser, soit par suite d'un écoulement du liquide par un orifice inférieur, soit par suite de l'évaporation qui se produit à sa surface; on pourra employer le moyen suivant, dont on se sert notamment dans les opérations chimiques, lorsqu'on a à filtrer une assez grande quantité de liquide. Au-dessus du vase dans lequel on veut entretenir un niveau constant (fig. 340) (ici ce vase est un entonnoir qui contient un filtre de papier), on dispose un autre vase renversé et à étroite ouverture; ce second vase a été d'avance rempli de liquide qui doit venir peu à peu dans le premier vase, pour y remplacer celui qui en sera sorti. L'orifice de ce second vase est placé précisément à la hauteur à laquelle on veut entretenir le niveau dans le premier. Le liquide qu'il contient, ne communiquant pas librement avec l'atmosphère par sa partie supérieure, ne peut pas s'écouler, tant que l'orifice inférieur plonge d'une petite quantité dans le liquide du premier vase. Ce liquide est soutenu par la pression atmosphérique, qui se transmet par l'orifice inférieur du vase, et qui n'est pas entièrement vaincue par la pression provenant de l'air dont le liquide est surmonté, en raison de la dilatation, et par suite de la diminution de force élastique que cet air a éprouvée tout d'abord. Lorsque le niveau du liquide baisse dans le vase inférieur, et découvre ainsi l'orifice du vase supérieur, une bulle d'air pénètre par cet orifice, monte dans le haut du vase, et une portion correspondante de liquide passe du vase supérieur dans le vase inférieur. Le niveau du liquide se trouve ainsi relevé dans le vase inférieur. S'il s'abaisse encore, il va livrer passage à une nouvelle bulle d'air, qui pénétrera dans le vase supérieur, pour en faire sortir une nouvelle quantité de liquide, et ainsi de suite. Le niveau est ainsi entretenu à une hau-

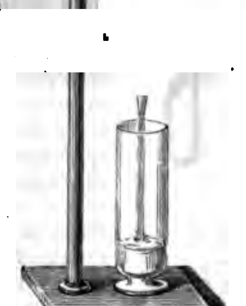


Fig. 340.

teur constante dans le vase inférieur, tant que l'autre vase contient encore une portion du liquide qui y avait été introduit tout d'abord.

§ 256. **Tubes de sûreté.** — Le jeu des tubes de sûreté, que l'on adapte souvent aux appareils, dans les opérations chimiques, peut être aisément compris, à l'aide des principes qui précèdent. Ces tubes sont employés pour éviter les accidents qui pourraient résulter de ce que la force élastique du gaz contenu dans l'appareil serait trop différente de celle de l'air atmosphérique. Si cette force élastique devenait trop considérable, elle pourrait donner lieu à une explosion; si elle était trop faible, il en résulterait une sorte d'aspiration qui ferait monter à l'intérieur de l'appareil les liquides avec lesquels il est en communication, ce qui pourrait encore donner lieu à de graves accidents. Pour se mettre à l'abri de ces accidents, on monte, sur une des parties de l'appareil, un tube doublement recourbé (fig. 341), dont la branche du milieu présente un renflement, et dont l'extrémité supérieure s'évase en entonnoir; et l'on introduit dans ce tube une petite quantité de liquide, soit de l'eau, soit du mercure. Le liquide intercepte la communication qui existait auparavant dans toute la longueur du tube recourbé; et le gaz qui est contenu dans l'appareil, pénétrant par la partie *a* du tube, jusque dans le réservoir *b*, ne peut pas se répandre dans l'atmosphère, en s'échappant par la partie *c* du tube. Si la force élastique du gaz intérieur était précisément égale à celle de l'air atmosphérique, les surfaces libres du liquide se trouveraient au même niveau, dans le réservoir *b* et dans le tube *c*. Mais s'il y a excès de l'une des deux forces élastiques sur l'autre, elle fera baisser la surface libre du liquide sur laquelle elle agit, l'autre surface montera en même temps; et la différence de niveau de ces deux surfaces sera d'autant plus grande qu'il y aura plus de différence entre les forces élastiques à l'intérieur et à l'extérieur. Dans le cas où le gaz intérieur acquerrait une trop forte tension, le liquide serait chassé de la boule *b*, et projeté au dehors par le tube *c*; alors la communication étant rétablie dans toute la longueur du tube de sûreté, le gaz intérieur pourrait se répandre dans l'atmosphère, en le traversant, et sa force élastique diminuerait promptement. Dans le cas, au contraire, où la diminution de tension à l'intérieur de l'appareil pourrait donner lieu à une *absorption*, tout le liquide rentrerait dans la boule *b*, et des bulles d'air, traversant ce liquide sans

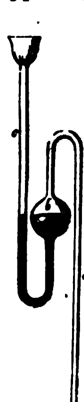


Fig. 341.

difficulté, à cause de la largeur de l'espace qu'il occ vi
draient les unes après les autres pénétrer dans l'a
tube *a*, ce qui élèverait assez promptement la forc
gaz qui y est contenu, pour qu'il ne se produisît rien

§ 257. **Manomètres.** — Pour mesurer la force élast
gaz contenu dans une enveloppe fermée, on emploie des app
auxquels on donne le nom de *manomètres*. On divise ces
en deux espèces bien distinctes : les *manomètres à ai*
les *manomètres à air comprimé*.

Un manomètre à air libre est un tube doublement
entièrement analogue au tube de sûreté dont nou
parler; il n'y a de différence que dans la longueur de l
(fig. 341), qui est généralement beaucoup plus gra
manomètre que dans un tube de sûreté. L'excès de la f
que du gaz sur celle de l'air atmosphérique détermi
cension du liquide (qui est ici du mercure) dans l
et le rapport qui existe entre la différence de niveau
surfaces libres et la hauteur de la colonne barométriq
naître le nombre d'atmosphères dont se compose l'ex
élastique que l'on veut mesurer. D'après cela, si la di
niveau du mercure dans le manomètre est de $0^m,76$
exercée par le gaz est de 2 atmosphères; si cette d
niveau est de 2 fois $0^m,76$, la pression du gaz est de 3 at
res, et ainsi de suite. Une échelle graduée est disposée à
la branche dans laquelle la pression du gaz fait monter le mercure; et la graduation est faite de manière à indiquer immédiatement la valeur de cette pression en atmosphères et dixièmes d'atmosphère, d'après la position qu'occupe la surface libre du mercure le long de l'échelle.

§ 258. La disposition du manomètre à air comprimé est analogue à celle du manomètre à air libre; mais la branche *c* (fig. 342), dans laquelle la pression du gaz fait monter le mercure, est fermée à sa partie supérieure, au lieu d'être ouverte comme dans le manomètre à air libre. La présence d'une certaine quantité d'air, emprisonnée dans cette branche fermée *c*, fait que le mercure ne peut pas y monter d'une aussi grande hauteur, pour une même pression du gaz dans la branche *ab* ; car, à mesure que le mercure monte en *c*, l'air dont il est surmonté se comprime, et sa force élastique contribue, avec la différence de niveau du mercure dans les deux branches, à faire équilibre à la pression que le gaz exerce en *b*. Si, par exemple, l'air contenu

Fig. 342.

en *c* est réduit à n'occuper que la moitié du volume qu'il occupait sous la pression atmosphérique, sa force élastique sera double de ce qu'elle était ; la pression exercée en *b* sera donc de 2 atmosphères, plus la fraction d'atmosphère que représente la différence de niveau du mercure en *b* et en *c*. Le tube est gradué d'avance, de manière à faire connaître immédiatement la force élastique du gaz qui agit en *b*, d'après la position que cette force élastique fait prendre à l'extrémité de la colonne de mercure en *c*.

Pour qu'un manomètre à air comprimé indique toujours exactement la force élastique du gaz avec lequel il est mis en communication, il faut que la température de l'air emprisonné dans le tube manométrique reste toujours la même que celle qu'il avait lorsqu'on a gradué l'appareil. Nous avons vu, en effet (§ 250), que les changements de température influent d'une manière très-notable sur la force élastique d'une masse de gaz qui conserve un même volume. Lorsqu'un manomètre à air comprimé fonctionne à des températures autres que celle à laquelle il a été gradué, il peut fournir une mesure très-inexacte de la force élastique qu'il est destiné à mesurer.

§ 259. **Compressibilité des liquides.** — Lorsque l'on soumet à une très-forte pression une certaine quantité d'un liquide contenu dans une enveloppe fermée, le liquide éprouve une diminution de volume qui est tellement petite, que l'on a douté pendant longtemps qu'elle existât réellement, et c'est de là que les liquides ont reçu le nom de *fluides incompressibles*. Dans les expériences qui ont été faites pour reconnaître si les liquides étaient compressibles, le piston par lequel on exerçait une pression sur une portion de la surface du liquide marchait bien d'une certaine quantité dans le sens de la pression qui lui était appliquée, il pénétrait bien un peu à l'intérieur de l'enveloppe fermée qui contenait le liquide ; mais cette diminution apparente du volume du liquide pouvait être uniquement due à l'extension des parois de l'enveloppe, produite par la grande pression qu'elles éprouvaient de la part du liquide. On ne pouvait arriver à un résultat concluant, qu'en s'opposant à cette extension des parois, à l'aide d'une pression appliquée sur elles extérieurement, et capable de faire équilibre à la pression intérieure. C'est ainsi qu'Œrstedt fut conduit à employer l'appareil suivant nommé *piézomètre*.

Un réservoir de verre *a* (fig. 343), est fermé de toutes parts, excepté à sa partie supérieure, où il est muni d'un tube *b* d'un petit diamètre. On remplit d'eau le réservoir et le tube, en ayant soin d'intro[illegible] même temps, dans ce tube, une petite quantité

de mercure destiné à servir d'index. Le tout est ensuite placé à l'intérieur d'un vase A, également de verre, que l'on remplit complétement d'eau. Un piston B ferme exactement ce vase ; sa tige, garnie d'un filet de vis, traverse le couvercle C qui fait fonction d'écrou, et se termine par une poignée à l'aide de laquelle on peut la faire tourner dans cet écrou. Lorsqu'on vient à agir sur cette poignée, de manière à faire descendre le piston B dans le vase A, l'eau qu'il contient éprouve une pression de la part de ce piston ; cette pression se transmet au réservoir *a*, et au liquide qu'il contient, et l'on voit l'index de mercure s'abaisser dans le tube *b*. Si la capacité intérieure du réservoir *a* et de la portion du tube qui est au-dessous de l'index de mercure pouvait augmenter par suite de la pression qui est exercée, l'abaissement de cet index ne prouverait pas que l'eau contenue dans le réservoir a diminué de volume. Mais il n'en est pas ainsi. Le réservoir et le tube sont soumis de toutes parts à la pression qui est déterminée par l'enfoncement du piston B ; le verre dont ils sont formés est comprimé dans tous les sens de la même manière. Si l'on considère une petite portion de cette enveloppe de verre, on verra que ses dimensions doivent diminuer, tant dans sa hauteur et sa largeur, que dans son épaisseur ; en un mot, le réservoir *a* et le tube *b*, diminuant de dimensions dans tous les sens, doivent prendre une forme *semblable* à la forme qu'ils avaient d'abord, le mot semblable étant employé ici dans l'acception qu'on lui donne en géométrie. La pression exercée par le piston B donne donc lieu à une diminution de la capacité intérieure du réservoir *a* et du tube *b*, tout aussi bien qu'à une diminution de l'espace occupé par le verre dont ils sont formés. D'après cela, si l'index du mercure restait stationnaire dans le tube *b*, au moment où l'on exerce la pression, cela indiquerait déjà que l'eau du réservoir *a* a diminué de volume ; l'abaissement de l'index indique donc, à plus forte raison, une diminution réelle dans le volume de l'eau.

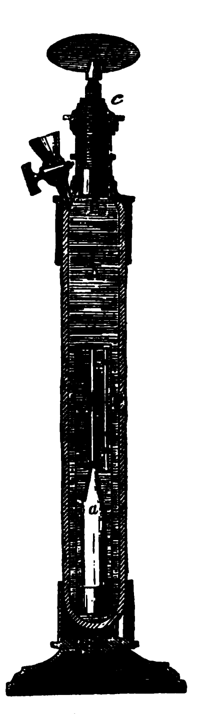


Fig. 343.

Un tube de verre *m*, fermé par le haut, et gradué en parties d'égal volume, est placé à côté du réservoir *a*. Ce tube était plein d'air lorsque l'eau du vase A n'était soumise qu'à la pression atmosphérique. La pression produite par l'abaissement du piston B détermine une diminution de volume de cet air; l'eau monte dans le tube *m*; la position qu'y occupe son niveau dépend de la grandeur de la pression, et peut servir à la mesurer. Ce tube *m*, ouvert par le bas, et primitivement rempli d'air, constitue un véritable manomètre à air comprimé.

Des expériences précises, faites par M. Regnault, avec un appareil un peu différent de celui dont nous venons de parler, l'ont conduit aux résultats suivants. Le volume d'une masse d'eau diminue de 0,000048 pour chaque atmosphère dont s'accroît la pression que supporte cette eau; c'est-à-dire que, si une masse d'eau, dont le volume est d'un million de litres, lorsque l'eau n'a aucune pression à supporter, venait à être soumise à une pression de 1 atmosphère, de 2 atmosphères, de 3 atmosphères... son volume diminuerait de 48 litres, de 2 fois 48 litres, de 3 fois 48 litres,..... Le volume d'une masse de mercure diminue de même de 0,0000035, pour chaque atmosphère dont augmente sa pression.

§ 260. **Équilibre des fluides dont les diverses parties ne sont pas à la même température.** — Nous avons trouvé qu'un liquide, ou un gaz, soumis à la seule action de la pesanteur, ne pouvait être en équilibre qu'autant que la pression était la même pour tous les points situés sur un même plan horizontal (§§ 213 et 239); cette condition ne peut être remplie qu'autant que la température est aussi la même pour tous les points. Supposons, en effet, que le fluide que nous considérons soit divisé en couches minces par un grand nombre de plans horizontaux menés à de petites distances les uns au-dessus des autres, et voyons ce qui arriverait si la température n'était pas la même dans toute l'étendue d'une de ces couches. Nous savons que, sous une même pression, la densité d'un fluide (liquide ou gaz, peu importe) est, sauf quelques exceptions, d'autant plus faible que sa température est plus élevée. La densité du fluide varierait donc dans l'étendue de notre couche; et la pression, étant la même pour tous les points de sa face supérieure, ne serait plus la même pour tous les points du plan horizontal qui la termine inférieurement, puisque la différence des pressions en deux points d'une même verticale, pris sur les deux faces de cette couche, est égale au poids de la colonne de fluide comprise entre ces deux points, et que ce poids ne serait pas le même dans les diverses parties de la couche. L'inégalité de température aux divers points d'une même couche horizontale ne peut donc

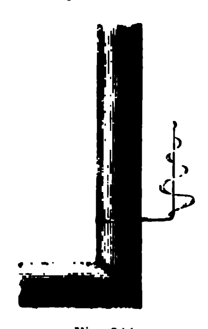
pas s'accorder avec l'équilibre du fluide, puisqu'il en résulte nécessairement des inégalités de pression, pour des points situés à un même niveau. Donc un fluide pesant, dont les diverses parties ne sont pas à la même température, ne peut être en équilibre qu'autant qu'il est disposé par couches horizontales, dans chacune desquelles la température est la même partout. Ces couches superposées seront comme si elles étaient formées d'autant de liquides de densités différentes, qui ne peuvent être en équilibre les uns au-dessus des autres, sans que leurs surfaces de séparation soient planes et horizontales (§ 227). La stabilité de l'équilibre exigeant d'ailleurs que la densité ne croisse pas en passant d'une couche à une autre couche plus élevée, on voit que généralement la température croîtra à mesure qu'on s'élèvera dans le fluide.

Ce dernier résultat est sujet à quelques exceptions. On sai[illegible] exemple, que la densité de l'eau, qui décroît généralen[illegible] mesure que la température s'élève, s'accroît au contraire lo[illegible] la température passe de 0° à 4°,1 : cette anomalie en ent[illegible] une correspondante dans la distribution des températures, [illegible] les diverses parties d'une masse d'eau en équilibre, lorsque [illegible] ces températures il s'en trouve qui sont compri[illegible] 4°,1. Lorsqu'une masse de gaz, d'une températ[illegible], est en équilibre, les couches supérieures sont moi[illegible] que les couches inférieures (§ 240); on conçoit qu'on puisse refroidir les couches supérieures, d'une quantité assez petite pour que leurs densités, tout en augmentant par cet abaissement de température, restent cependant plus faibles que celles des couches inférieures : l'équilibre subsistera encore, et restera stable, quoique la température diminue quand on passera d'une couche à une autre plus élevée. C'est ce dernier cas qui se présente dans l'atmosphère de la terre : les densités des couches horizontales, dans lesquelles on peut décomposer une colonne d'air s'élevant dans toute la hauteur de l'atmosphère, vont constamment en diminuant de bas en haut, et cependant la température s'abaisse aussi constamment.

§ 261. Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase, et qu'on chauffe extérieurement une portion de la paroi latérale ou inférieure du vase, la chaleur se transmet au liquide à travers cette paroi, et l'équilibre est troublé. Le liquide échauffé monte ; il est remplacé par une autre portion de liquide qui s'échauffe à son tour, et ainsi de suite : en sorte qu'il en résulte un mouvement continuel de circulation, qui amène successivement les diverses portions du liquide en contact avec la paroi chauffée, et détermine

une élévation progressive de la température de toute la masse liquide. Si le liquide était chauffé seulement par le haut, le mouvement de circulation dont nous venons de parler ne se produirait pas, et la chaleur ne se propagerait qu'avec une grande lenteur dans toute la masse liquide. Le mouvement ainsi produit dans une masse d'eau, par l'échauffement d'une partie de la paroi du vase qui la renferme, peut être rendu visible au moyen d'un peu de sciure de bois qu'on introduit dans le liquide, et dont les diverses parcelles participent au mouvement occasionné par la chaleur.

Des mouvements analogues se produisent dans une masse de gaz en équilibre, lorsqu'on vient à chauffer une portion de la paroi dans laquelle ce gaz est renfermé, ou bien un corps avec lequel il est en contact. Si l'on fait du feu dans un poêle dont le tuyau s'élève au milieu de l'air contenu dans une chambre, ce tuyau s'échauffe, et l'air qui le touche, s'échauffant également, se met en mouvement de bas en haut. Un courant ascendant existe ainsi continuellement, tout autour du tuyau, tant qu'il reste plus chaud que l'air environnant. Ce courant est rendu visible, lorsque la lumière du soleil vient tomber sur le tuyau, et projeter son ombre sur un mur voisin : on voit, de part et d'autre de l'ombre du tuyau, des ombres légères qui voltigent avec rapidité, et qui sont produites par le jeu de la lumière dans l'air en mouvement, en raison des changements de densité de cet air occasionnés par le mouvement lui-même. Mais on peut aussi rendre le courant ascendant bien sensible, en adaptant au tuyau un fil de fer recourbé de bas en haut (fig. 344), et posant sur sa pointe une bande de papier qui s'abaisse tout autour de lui en forme d'hélice; l'air, en venant frapper la face inférieure de cette bande de papier, qui se présente partout obliquement sur son passage, lui communique un mouvement de rotation autour de la verticale qui passe par son point d'appui.


Fig. 344.

Les mouvements de l'air atmosphérique, c'est-à-dire les *vents*, sont dus à ce que certaines parties de l'atmosphère changent de densité en conservant une même force élastique, en sorte que l'équilibre ne pouvant plus subsister, l'air se met en mouvement pour prendre une disposition différente dans laquelle il soit de nouveau en équilibre. Si la cause qui a troublé l'équilibre con-

tinue à agir, le mouvement de l'air continuera également. Les changements de densité qui déterminent ces mouvements sont produits soit par des changements de température, soit par la présence d'une quantité plus ou moins grande de vapeur d'eau qui vient se mêler à l'air.

§ 262. **Aérage des mines.** — Il arrive souvent qu'un espace rempli d'air communique de plusieurs manières différentes avec l'atmosphère : c'est ainsi que l'air contenu dans une chambre est en communication avec l'air atmosphérique, soit par les joints des portes et fenêtres, soit par la cheminée. Dans de pareilles circonstances, les différences de température en divers points déterminent encore des mouvements de l'air, ainsi que nous allons le reconnaître.

Considérons d'abord ce qui arrive, quand une cavité souterraine, une mine par exemple, communique avec l'atmosphère par deux puits verticaux (fig. 345). Pour l'équilibre de l'air, tant à l'intérieur de la mine qu'à l'extérieur, il faut que la pression soit la même pour tous les points situés sur un même plan horizontal mené à l'intérieur d'une portion quelconque de l'espace occupé par le gaz. Les pressions en A et B doivent donc être égales entre elles, ainsi que les pressions en C et D. Mais la différence des pressions en A et en C est égale au poids de la colonne d'air AC ; la différence des pressions en B et en D est égale au poids de la colonne d'air BD : donc il faut que les poids des deux colonnes d'air AC, BD, soient les mêmes. Cette condition sera remplie, si la température est la même dans toute l'étendue de la masse d'air. Elle le sera encore, si la température varie de la même manière le long des deux colonnes d'air AC, BD ; ou bien encore si les changements de densité résultant des températures diverses qui existent le long de ces colonnes d'air se compensent de part et d'autre. Mais il arrivera très-rarement que les choses se passent ainsi : habituellement les poids des colonnes d'air AC, BD, ne seront pas égaux, et l'équilibre ne

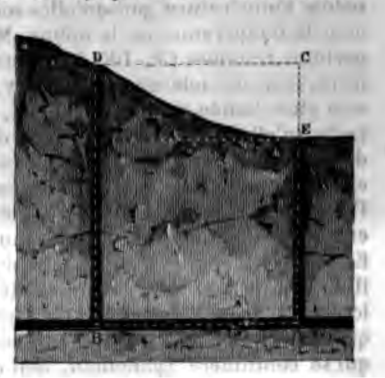


Fig. 345.

pouvant avoir lieu, il en résultera un mouvement, en vertu duquel l'air descendra par un des deux puits, et remontera par l'autre.

Supposons que les orifices des deux puits ne soient pas au même niveau, comme l'indique la figure 345. Cette seule circonstance donnera lieu à un courant d'air continuel à l'intérieur de la mine, courant qui sera dirigé dans un sens en été, et en sens contraire en hiver. On sait, en effet, que la température de l'intérieur de la terre, à une petite profondeur au-dessous du sol, reste constante pendant toute l'année, et que cette température est inférieure à celle de l'air en été, supérieure au contraire à celle de l'air en hiver.

Les portions AE, BF de nos deux colonnes d'air, qui sont situées au-dessous du plan horizontal mené par le plus bas des orifices des deux puits, peuvent être regardées comme ayant la même température, puisqu'elles sont en contact avec des parois dont la température est la même. Mais il n'en est plus ainsi des portions restantes CE, DF : la première est à l'extérieur de la terre, et la seconde est à l'intérieur. En été, la colonne d'air CE sera plus chaude que la colonne DF, et par conséquent moins pesante qu'elle ; l'inégalité de poids des colonnes totales AC, BD, donnera lieu à un mouvement ascendant dans le puits de droite. et descendant dans le puits de gauche. L'air chaud, venant de l'extérieur, et pénétrant dans le puits de gauche, s'y refroidira, et le mouvement continuera constamment de la même manière. En hiver, la colonne d'air CE sera plus froide que la colonne DF; il en résultera encore une inégalité de poids pour les deux colonnes AC, BD. Mais cette inégalité ne sera plus dans le même sens qu'en été, et elle donnera lieu à un mouvement de sens contraire, qui se continuera également, tant que la température de l'air sera moins élevée en dehors des puits qu'à leur intérieur.

Il est indispensable qu'il se produise, à l'intérieur des mines, des courants tels que ceux dont nous venons de parler, afin de renouveler l'air dans les lieux où se trouvent les ouvriers. Lorsqu'une mine ne se trouve pas dans des conditions convenables pour que l'aérage se fasse naturellement, comme nous venons de l'indiquer, on a recours à des moyens artificiels. Un de ceux qu'on emploie le plus fréquemment consiste à établir un petit foyer dans le voisinage de l'un des deux puits qui communiquent l'un à l'autre par l'intérieur de la mine ; les gaz chauds qui se dégagent de ce foyer se rendent dans les puits, et la différence de température des colonnes d'air qui existent dans les deux puits détermine un courant. Dans les mines de houille, il est souvent dangereux d'employer ainsi des foyers d'aérage, parce que l'air qui

vient de la mine, et dont une partie passe sur le foyer, peut contenir une quantité d'hydrogène carboné assez grande pour qu'il se produise une explosion, qui s'étendrait dans toute la mine. Dans ce cas, on peut surmonter l'orifice d'un des puits d'une cheminée d'appel, et établir, vers le bas de cette cheminée, un calorifère A (fig. 346), dont la surface extérieure est seule en contact avec l'air qui vient de la mine.

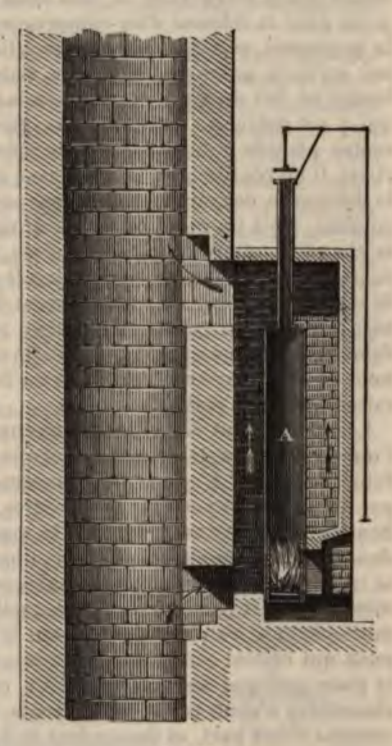


Fig. 346.

Souvent la cavité souterraine qu'on veut aérer ne communique avec l'atmosphère que par un seul puits. Dans ce cas on divise le puits en deux compartiments par une cloison verticale ; ou bien on dispose dans le puits un large tuyau, afin de faire communiquer l'air du fond avec l'atmosphère par deux voies différentes. On s'arrange ensuite de manière à produire une différence de température dans les deux compartiments du puits, et les choses se passent de la même manière que s'il y avait deux puits distincts.

§263. **Tirage des cheminées.** — Le tirage d'une cheminée est dû à la différence des densités de l'air qui est à son intérieur, et de l'air extérieur qui est situé au même niveau. L'air de l'intérieur de la chambre où existe cette cheminée ne peut être en équilibre qu'autant qu'il éprouve une pression égale sur tous les points d'un même plan horizontal, soit que cette pression lui soit transmise par l'intérieur de la cheminée, soit qu'elle le soit par les fentes des portes et des fenêtres. Si l'air extérieur est en équilibre, les pressions sont les

mêmes pour tous les points d'un même plan horizontal qui passe au-dessus de la cheminée; pour que les pressions exercées sur un plan horizontal mené à l'intérieur de la chambre soient toutes égales entre elles, il faut donc que l'on trouve le même poids pour la colonne d'air comprise entre ce plan horizontal et le précédent, soit qu'on la prenne à l'intérieur de la cheminée, soit qu'on la prenne à l'extérieur. Mais cela ne peut pas arriver lorsqu'on fait du feu dans la cheminée; la chaleur dilate l'air qui y est contenu, et la colonne d'air qui lui correspond est moins pesante qu'une colonne de même hauteur prise à l'extérieur. Il en résulte qu'il ne peut pas y avoir équilibre, et tant que la différence de température, et par suite la différence de densité subsiste, il y a un mouvement continuel en vertu duquel l'air de la chambre monte dans la cheminée, tandis que l'air extérieur rentre dans la chambre par les joints des portes et des fenêtres. Si la chambre était hermétiquement fermée de toutes parts, de manière que l'air extérieur ne puisse pas y rentrer, la cheminée fumerait nécessairement; puisque le courant d'air dont nous venons de parler, courant qui entraîne la fumée avec lui, ne pourrait nullement s'établir.

Lorsque l'on fait du feu dans deux chambres qui communiquent l'une avec l'autre, il arrive souvent que l'une des deux cheminées fume. Cela tient à ce que, les communications avec l'extérieur, par les joints des portes et des fenêtres, présentant quelques difficultés au mouvement de l'air, la masse d'air qui est contenue dans les deux chambres, et qui va librement de l'une à l'autre, se trouve dans des conditions analogues à celles de l'air d'une mine. Les deux cheminées, par lesquelles cette masse d'air communique avec l'atmosphère, jouent le même rôle que les deux puits qui relient l'intérieur de la mine avec la surface du sol; et pour peu que les colonnes d'air contenues dans ces deux cheminées n'aient pas le même poids, il s'établit un courant ascendant d'une part, et descendant de l'autre. Ce n'est qu'en faisant un grand feu dans les deux cheminées qu'on pourra les empêcher de fumer l'une et l'autre; parce qu'en déterminant ainsi un appel assez considérable dans chacune d'elles, on fera passer, par les faibles ouvertures qui communiquent au dehors, une quantité d'air suffisante pour alimenter les deux cheminées.

On comprend, par ce qui précède, que plus une cheminée sera élevée, plus le tirage devra être fort. Cependant, au delà d'une certaine limite, une plus grande élévation de la cheminée *ne détermine* pas une augmentation de tirage. On conçoit en effet *que, si la force* ascensionnelle de la colonne d'air contenue à

l'intérieur d'une cheminée s'accroît avec la hauteur de cette minée, les frottements que cet air éprouve dans son m s'accroissent aussi; et il peut arriver que ce que l'on côté, on le perde de l'autre. C'est ce qui arrive en n'y a-t-il pas d'avantage, sous le rapport du tirage, à donner hauteur démesurée à une cheminée.

Lorsqu'on a été quelque temps sans faire du feu dans une minée, et que l'air atmosphérique, après avoir été froid pendant plusieurs jours, acquiert une température plus élevée, on obse qu'il se produit un courant descendant par la cheminée; on aperçoit à l'odeur de suie qui se répand dans la chambre. tient à ce que, l'air qui est à l'intérieur de la cheminée é plus froid que l'air extérieur situé au même niveau, et ayant suite, une plus grande densité, la colonne d'air intérieur plus pesante que la colonne d'air extérieure, pour une hauteur; et c'est ce qui détermine un courant en sens co de celui qui existe lorsqu'on fait du feu dans la chemin ce cas l'air de la chambre passe au dehors par les ou des portes et des fenêtres; et il est remplacé par celui c cend de la cheminée.

§264. **Principe d'Archimède.** — Un liquide pesant, en libre, exerce des pressions sur tous les corps avec lesquels il est en contact. Si l'on place à son intérieur un corps solide A (fig. 347), ce corps solide sera pressé par le liquide sur toutes les parties de sa surface; toutes les pressions auxquelles il sera ainsi soumis ont une résultante, dont nous allons reconnaître à la fois l'existence et la grandeur, par le raisonnement suivant.



Fig. 347.

Supposons d'abord que nous ayons simplement une masse liquide en équilibre, dans laquelle aucun corps n'est plongé. Nous pouvons considérer à son intérieur une portion de liquide dont l'ensemble présente exactement la même forme que le corps A. Cette portion de liquide reste immobile, quoiqu'elle soit pesante; elle ne tombe pas, en cédant à l'action de la pesanteur, parce qu'elle est soutenue par le liquide environnant. Imaginons que cette portion de liquide soit solidifiée, sans changement de densité, c'est-à-dire que toutes ses molécules ne soient plus susceptibles de changer de position les unes par rapport aux autres, tout en restant aux mêmes distances relatives que précédemment; il est clair que, par là, nous n'aurons pas troublé l'é-

quilibre. Nous aurons donc ainsi, un corps solide ayant exactement la même forme que le corps A, et qui sera soutenu au milieu du liquide qui l'environne, par les pressions que ce liquide exerce aux divers points de sa surface. Ces diverses pressions, faisant équilibre au poids du corps solide dont nous parlons, doivent avoir une résultante égale et directement opposée à ce poids; c'est-à-dire que cette résultante est verticale, qu'elle agit de bas en haut, et que sa direction passe par le centre de gravité du corps. Concevons maintenant que ce corps soit anéanti, et que le corps A lui soit substitué, sans que le liquide ait été dérangé: il est bien évident que les pressions exercées par le liquide, sur toute la surface de ce corps A, seront les mêmes que celles qui agissaient précédemment sur le corps dont il tient la place. On doit en conclure que *les pressions exercées par un liquide sur la surface d'un corps A, qui plonge à son intérieur, ont une résultante verticale, agissant de bas en haut, et égale au poids du liquide qui occuperait la place du corps* A; et que, de plus, *cette résultante passe par le centre de gravité du liquide déplacé.* Ce principe, d'une très-grande importance, a été découvert par Archimède, et porte son nom.

La résultante des pressions supportées par un corps qui plonge dans un liquide pesant en équilibre tend à faire monter ce corps; son poids tend à le faire descendre: le corps montera ou descendra, sous l'action simultanée de ces deux forces, suivant que la première l'emportera sur la seconde, ou réciproquement. Dans le cas où le poids du corps sera plus grand que la résultante des pressions qu'il supporte, il tombera; mais le mouvement qu'il prendra ne sera produit que par l'excès de son poids sur l'autre force. C'est ce qu'on énonce en disant qu'*un corps, plongé dans un liquide, y perd une portion de son poids égale au poids du liquide déplacé.*

§ 265. Le principe d'Archimède peut être vérifié par l'expérience, à l'aide de la *balance hydrostatique.*

Cette balance, dont le nom est tiré des usages auxquels elle est employée, présente une disposition particulière, qui permet d'élever ou d'abaisser à volonté le fléau, ainsi que les deux plateaux qu'il supporte. A cet effet, le fléau est supporté par une tige qui pénètre à l'intérieur d'une colonne creuse, fixée au pied de la balance (fig. 348); cette tige, dentée en forme de crémaillère, engrène avec un pignon C, à l'aide duquel on peut la faire monter ou descendre. La tige présente en outre, sur sa face opposée, d'autres dents, dans lesquelles pénètre un doigt D, mobile autour d'un point fixe situé vers son milieu; un petit ressort, en

nt l'extrémité inférieure de ce doigt, maintient constamson extrémité supérieure engagée entre les dents. Par lisposition, on peut faire monter la tige qui supporte le en faisant tourner le pignon C, sans que le doigt D s'y op-et le doigt empêche ensuite le fléau de redescendre, lors-n'agit plus sur le pignon. Lorsqu'on veut abaisser le fléau,

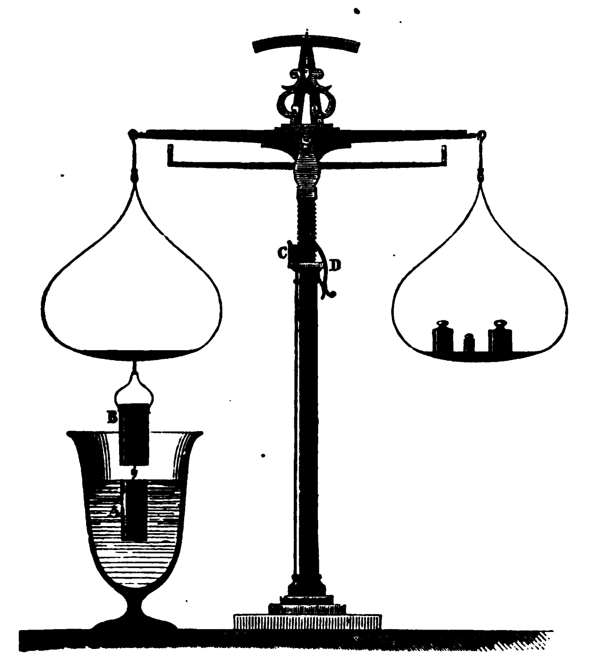


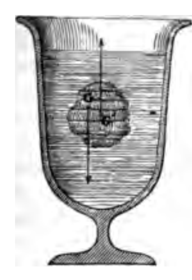
Fig. 348.

se sur l'extrémité inférieure du doigt D; on fait fléchir le essort, et l'extrémité supérieure, en s'écartant des dents ige, lui permet de redescendre librement.

ns maintenant comment on se sert de la balance hydrosta-our vérifier le principe d'Archimède. On prend un cylindre ique A, et un cylindre creux B dont la capacité intérieure tre exactement remplie par le premier. On les suspend l'un sous de l'autre, comme l'indique la figure, à un crochet à l'un des plateaux de la balance, et on leur fait équi-

libre, en mettant des poids dans l'autre plateau. Cela fait, on élève le fléau avec les deux plateaux, ce qui ne détruit pas l'équilibre; puis, ayant disposé un vase contenant de l'eau, au-dessous des deux cylindres A et B, on abaisse le fléau, de manière à faire plonger le cylindre A dans le liquide. Aussitôt que ce cylindre a pénétré un peu dans l'eau, l'équilibre est troublé; le plateau qui supporte les deux cylindres A et B n'agit plus assez fortement sur le fléau, pour faire équilibre au poids de l'autre plateau. Cela tient à ce que le cylindre A, soulevé par le liquide dans lequel il plonge, se trouve dans les mêmes conditions que s'il perdait une portion de son poids. Pour rétablir l'équilibre, il suffit de verser de l'eau dans le cylindre creux B; et l'on voit qu'il ne peut être rétabli, de manière que le corps A soit entièrement plongé dans l'eau du vase (fig. 348), qu'autant que le cylindre B est entièrement rempli d'eau. On vérifie bien par là que le corps A, plongé dans l'eau, y perd une portion de son poids égale au poids de l'eau dont il tient la place.

§ 266. Lorsqu'un corps solide est abandonné au milieu d'un liquide, il est soumis à l'action de deux forces qui agissent en sens contraires : son poids tend à le faire descendre, et la résultante des pressions que le liquide exerce sur sa surface, ou bien ce que l'on nomme la *poussée* du liquide, tend à le faire monter. La première de ces deux forces est appliquée au centre de gravité G du corps (fig. 349); la seconde force, capable de maintenir en équilibre le liquide qui tiendrait la place du corps, si ce liquide était solidifié, peut être regardée comme appliquée au centre de gravité G′ de ce liquide. Si le corps était homogène, c'est-à-dire si la matière dont il est composé était répartie uniformément dans toute l'étendue du volume qu'il occupe (§ 39), son centre de gravité G coïnciderait avec le centre de gravité G′ du liquide qu'il déplace : mais il n'en est généralement pas ainsi, lorsque le corps n'est pas homogène.


Fig. 349.

Pour qu'un corps solide, placé au milieu d'un liquide, s'y maintienne en équilibre, il faut : 1° que son poids soit égal au poids du liquide qu'il déplace; 2° que les centres de gravité du corps et du liquide déplacé coïncident, ou bien soient situés sur une même verticale. On voit en effet que, s'il en est ainsi, le corps sera soumis à l'action de deux forces égales, de sens contraires, et agissant suivant une même ligne droite, et que ces

forces se détruiront mutuellement : tandis que, dans le cas où ces conditions ne seraient pas toutes deux remplies, les forces appliquées au corps ne se détruiraient pas, et le mettraient nécessairement en mouvement. Si le centre de gravité d'un corps, qui est en équilibre au milieu d'un liquide, ne coïncide pas avec le centre de gravité du liquide qu'il déplace, l'équilibre sera stable ou instable, suivant que le premier de ces deux points sera placé au-dessous ou au-dessus du second.

Lorsqu'un poisson reste complétement immobile au milieu de l'eau, il remplit les deux conditions dont nous venons de parler. Si, par un moyen quelconque, il vient à augmenter son volume, sans augmenter son poids, l'équilibre sera troublé ; l ussée de l'eau, devenant plus forte qu'elle n'était précéder fera monter. Le contraire aura lieu, s'il diminue son vo poussée du liquide diminuera en même temps, et l'e son poids sur cette poussée le fera descendre. C'est au d'un organe particulier, qu'on nomme la *vessie natato* certains poissons produisent ces augmentations et dimi- de leur volume. Cet organe consiste en une enveloppe qui contient un gaz. Une compression plus ou moins exercée par l'animal sur cette masse de gaz, lui fait éprouve diminution de volume correspondante ; en sorte que, par seule compression, qu'il fait varier à volonté, il peut s'éle s'abaisser dans l'eau au milieu de laquelle il est ploi

Lorsqu'on introduit un grain de raisin dans un ver... plein de vin de Champagne, ce grain tombe immédiatement au fond du verre. Mais l'acide carbonique, qui se dégage continuellement de la liqueur, vient bientôt s'arrêter, sous forme de petites bulles, tout autour du grain. Ces bulles de gaz, faisant corps pour ainsi dire avec le grain de raisin, en augmentent le volume, sans que son poids augmente notablement ; la poussée du liquide, qui était d'abord plus petite que le poids du grain, ne tarde pas à devenir plus grande que ce poids, et le grain monte jusqu'à la surface du liquide. Si alors on donne une petite secousse au grain, pour en détacher les bulles d'acide carbonique qui étaient adhérentes à sa surface, on le voit redescendre au fond du verre ; puis, au bout de quelque temps, il remonte de nouveau. L'expérience peut être ainsi continuée tant que dure le dégagement de l'acide carbonique.

§ 267. **Corps flottants.** — Nous venons de voir que si un corps est abandonné au milieu d'un liquide, et si son poids est inférieur au poids du liquide qu'il déplace, il remonte vers la surface. C'est ce qui arriverait, par exemple, pour un morceau de liége qu'on aurait introduit au milieu d'une masse d'eau.

Mais lorsque ce corps s'est ainsi élevé jusqu'à la surface du liquide, il s'y arrête et y prend une certaine position d'équilibre. Dans cette position, il n'est pas entièrement plongé dans le liquide; il fait saillie au-dessus de sa surface libre.

Si l'on se reporte au raisonnement qui a été fait (§ 264) pour arriver au principe d'Archimède, on se rendra compte facilement de la manière dont l'équilibre peut être établi. Le corps, ne plongeant qu'en partie dans le liquide, ne doit pas en éprouver une poussée aussi grande que s'il y plongeait en totalité. Si le corps était anéanti instantanément, et que le creux qu'il laisserait ainsi dans la masse liquide fût rempli avec du liquide de même nature, ce liquide, qui tiendrait la place de la partie plongée du corps, serait maintenu en équilibre par les pressions exercées sur toute sa surface par le liquide environnant. Ces pressions étant les mêmes que celles que supportait le corps, on peut dire que la poussée d'un liquide sur un corps qui pénètre partiellement à son intérieur est égale au poids du liquide déplacé par la partie plongée du corps; de plus, la force qui représente la poussée peut être supposée appliquée au centre de gravité de ce liquide déplacé.

Lorsque la poussée d'un liquide, sur un corps qui est entièrement plongé à son intérieur, est plus grande que le poids du corps, celui-ci monte jusqu'à ce qu'il ait atteint la surface libre du liquide. Dès lors, s'il continue à monter, la partie qui reste plongée dans le liquide diminue de plus en plus; la poussée du liquide sur le corps diminue en conséquence, et l'on conçoit qu'il arrivera un moment où cette poussée, qui était d'abord plus grande que le poids du corps, lui deviendra égale. Si le corps continue à monter, en vertu de sa vitesse acquise, la force qui le pousse de bas en haut diminuera encore; son poids l'emportera sur cette force, et détruira bientôt son mouvement ascendant pour le faire redescendre. Le corps viendra ainsi prendre une position d'équilibre, dans laquelle il se maintiendra en flottant à la surface du liquide. Pour que cet équilibre existe, il faut : 1° que le poids total du corps soit égal au poids du liquide que déplace sa partie plongée; 2° que le centre de gravité G du corps (fig. 350), et le centre de gravité G′ du liquide déplacé, soient situés sur une même verticale.

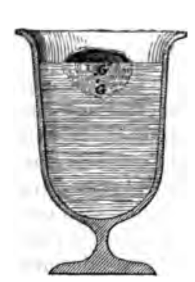


Fig. 350.

On voit par là que, pour qu'un corps puisse flotter sur un liquide, il faut que son poids soit inférieur au poids d'une quantité

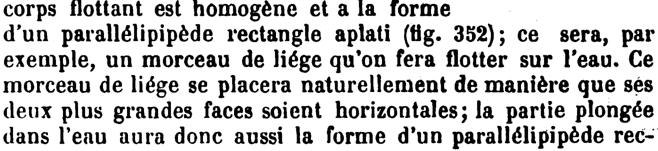
de ce liquide qui aurait le même volume que lui ; et que. à lité de volume, des corps flottants déplaceront d'autan liquide, et par suite feront d'autant plus saillie au-de surface libre du liquide, que ces corps seront moins p

§ 268. Les conditions qui viennent d'être énoncées sou saires et suffisantes pour qu'un corps flottant soit en éq mais l'équilibre peut être stable ou instable, suivant les Lorsque nous avons parlé de l'équilibre d'un corps entièrement plongé dans un liquide (§ 266), nous avons dit que l'équilibre serait stable ou instable, suivant que le centre de gravité du corps se trouverait au-dessous ou au-dessus du centre de gravité du liquide déplacé ; il n'en est plus de même ici : la stabilité de l'équilibre n'exige plus que le premier de ces deux points soit inférieur au second, ainsi que nous allons le reconnaître.

Examinons d'abord ce qui arriverait dans le cas d'un cylindre de petit diamètre, formé de deux parties de densités très-différentes et réunies bout à bout (fig. 351). Admettons que ce corps ait été construit de manière à pou un liquide, en se plaçant verticalement, et en de gravité au-dessous de celui du liquide qu'il dep on incline le cylindre d'un côté ou d'un autre, comme l'indique la figure, il se relèvera immédiatement sous l'action des deux forces qui lui sont appliquées, et dont l'une est son poids qui agit de haut en bas sur son centre de gravité G, et l'autre est la poussée du liquide agissant de bas en haut sur le centre de gravité G′ du liquide déplacé. L'équilibre est donc stable, et il en sera de même, quelle que soit la forme du corps, toutes les fois que le point G se trouvera au-dessous du point G′.

Fig. 352.

Voyons maintenant ce qui arrivera, si le corps flottant est homogène et a la forme



d'un parallélipipède rectangle aplati (fig. 352) ; ce sera, par exemple, un morceau de liége qu'on fera flotter sur l'eau. Ce morceau de liége se placera naturellement de manière que ses deux plus grandes faces soient horizontales ; la partie plongée dans l'eau aura donc aussi la forme d'un parallélipipède rec-

tangle. Les centres de gravité G et G′ du corps et du liquide déplacé, n'étant autre chose que les centres de figure des deux parallélipipèdes, le premier G sera nécessairement placé au-dessus du second G′; et cependant l'équilibre est stable. Voici à quoi cela tient. Le centre de gravité G du morceau de liége conserve une position invariable à l'intérieur de ce corps, de quelque manière qu'on déplace le corps. S'il en était de même du centre de gravité G′ du liquide déplacé, s'il coïncidait toujours avec un même point du morceau de liége, on voit qu'en inclinant ce corps d'un côté ou d'un autre, la ligne GG′ s'inclinerait en même temps; et que les forces qui agissent sur les points G et G′, la première de haut en bas, la seconde de bas en haut, feraient basculer le morceau de liége pour l'amener dans une autre position d'équilibre. Mais ce n'est pas ainsi que les choses se passent. Aussitôt que le morceau de liége est dérangé de sa position d'équilibre, le liquide qu'il déplace change de figure; le centre de gravité G′ de ce liquide occupe donc, dans le corps, une tout autre place que celle qu'il occupait précédemment. Si le corps flottant a été incliné vers la gauche (fig. 353), le point G′ ne se transporte pas à droite de la verticale menée par le point G, comme il le ferait s'il suivait le corps dans son mouvement; mais il se porte vers la gauche, et il en résulte que les forces qui sont appliquées aux points G et G′ tendent à ramener le corps flottant dans la position d'équilibre qu'on lui a fait quitter.

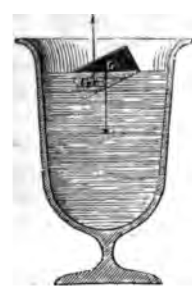


Fig. 353.

On doit conclure, de ce qui précède, que la stabilité de l'équilibre d'un corps flottant n'exige nullement que le centre de gravité de ce corps soit au-dessous de celui du liquide qu'il déplace. L'équilibre sera stable, si cette condition est remplie; mais il pourra y avoir également stabilité, sans qu'elle le soit.

§ 269. Si l'on prend des aiguilles à coudre, qu'on les passe plusieurs fois entre les doigts, pour les enduire d'une très-légère couche de graisse, et qu'on les pose avec soin sur la surface de l'eau contenue dans un vase, on voit ces aiguilles se maintenir sur cette surface, et y flotter, comme si elles étaient formées d'une matière moins dense que l'eau. L'acier est cependant beaucoup plus dense que l'eau; et, si les choses se passaient conformément à ce que nous avons dit précédemment, les aiguilles devraient tomber immédiatement au fond du liquide.

Cette espèce d'anomalie est due à un phénomène capillaire. Si l'on examine attentivement la surface de l'eau sur laquelle flotte l'aiguille, le jeu de la lumière qui se réfléchit sur cette surface fait voir que le liquide ne mouille pas l'aiguille; l'eau prend, dans le voisinage de l'aiguille, une forme analogue à celle que prend le mercure lorsqu'il est en contact avec une lame de verre (fig. 318, page 349). Cette dépression capillaire de la surface de l'eau, déterminée par la présence de l'aiguille, donne lieu à la formation d'une sorte de sillon dans lequel l'aiguille est placée. L'aiguille, en raison de la légère couche de grai [illegible] n l'a enduite, et qui lui a donné la propriété de ne pa [illegible] e par l'eau, déplace donc un [illegible] propre volume; et l'on co [illegible] déplacé puisse avoir un po [illegible] a que cette aiguille se trou [illegible] s c. corps de même poids, ma [illegible] ers. fisant pour remplir la tota [illegible] t n parler, ce corps serait moins dense que l'eau, et flotter surface, conformément au principe d'Archimède.

Cette assimilation de l'aiguille à un corps moins dense, plirait la totalité du sillon que sa présence détermine à l[illegible] de l'eau, peut ne pas paraître bien légitime. Un corps flotta[illegible] l'eau est pressé par le liquide, dans toute l'étendue des parois de la cavité que ce corps détermine en pénétrant à son intérieur; et c'est la résultante de toutes ces pressions qui constitue la poussée du liquide sur le corps, poussée qui est toujours égale au poids du liquide que le corps déplace. Dans le cas d'une aiguille qui flotte sur l'eau par un effet de capillarité, on ne voit pas que le liquide puisse de même presser l'aiguille dans toute l'étendue des parois du sillon qu'elle occasionne, puisqu'elle n'occupe qu'une partie de la capacité de ce sillon, et qu'elle n'est en contact qu'avec une faible portion de ses parois. On peut donc se demander s'il est bien exact de dire, dans ce cas, que la poussée de l'eau sur l'aiguille est égale au poids du liquide qui remplirait la totalité du sillon. Pour lever toute difficulté à cet égard, concevons, dans la masse d'eau qui supporte l'aiguille, un cylindre vertical assez large pour comprendre l'aiguille tout entière à son intérieur; et terminons inférieurement ce cylindre à un plan horizontal mené dans le liquide à une certaine distance au-dessous de sa surface libre. L'équilibre de toute la masse liquide exige évidemment que le contenu du cylindre exerce la même pression sur sa base, soit que l'aiguille s'y trouve placée à la surface de l'eau, soit qu'elle soit enlevée, et que le sillon qu'elle formait soit rempli d'eau de

manière à rétablir l'horizontalité dans toute l'étendue de la surface libre. Il résulte évidemment de là que le poids de l'aiguille capable de remplir le sillon qu'elle forme; ou bien encore, que la poussée du liquide sur l'aiguille est égale au poids du liquide total qui est déplacé, tant par elle que par l'effet de l'action capillaire que sa présence détermine.

C'est de la même manière qu'on explique que certains insectes marchent sur l'eau (fig. 354), sans que leurs pattes pénètrent à l'intérieur du liquide. Les pattes de ces insectes sont dans des conditions convenables pour ne pas être mouillées par l'eau. Lorsqu'elles viennent s'appuyer sur la surface du liquide, elles occasionnent des dépressions de cette surface; et l'insecte est en équilibre, lorsque les creux déterminés ainsi par ses diverses pattes sont tels que l'eau qui les remplirait pèse autant que lui.

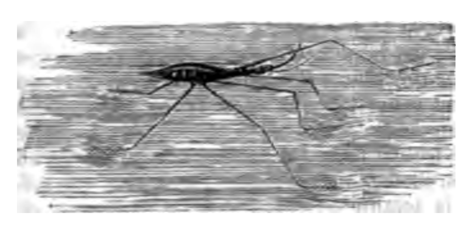


Fig. 354.

§ 270. **Mesure des densités.** — Le principe d'Archimède fournit un moyen très-simple de déterminer la densité d'un corps solide ou d'un liquide; c'est-à-dire de trouver le rapport du poids du corps au poids d'un égal volume d'eau. Pour cela on peut se servir de la balance hydrostatique (fig. 348) (page 395).

S'il s'agit d'un corps solide, on le suspend au-dessous de l'un des plateaux de la balance, à l'aide d'un fil très-délié; et on lui fait équilibre en mettant des poids marqués dans l'autre plateau. De cette manière, on obtient le poids du corps, tout aussi bien que si, au lieu de le suspendre au crochet dont est muni l'un des plateaux, on l'avait placé sur ce plateau. En opérant ensuite comme il a été dit dans le paragraphe 265, on fait plonger le corps dans un vase qui contient de l'eau. L'équilibre est troublé; et on le rétablit en ôtant une portion des poids marqués qui faisaient équilibre au corps. Les poids restants servent de mesure au poids du corps, lorsqu'il est dans l'eau; c'est-à-dire au poids du corps diminué du poids d'un égal volume d'eau. Donc, en divisant le poids du corps par la perte que ce poids a éprouvée lorsqu'on a fait plonger le corps dans l'eau, on aura la densité de ce corps. Si, par exemple, le corps dont on veut trouver la densité pèse $25^{gr},72$ hors de l'eau, et $18^{gr},37$ dans l'eau, la perte de poids

sera de $7^{gr},35$; et la densité sera égale à $\frac{2572}{735}$ ou bien à
Pour déterminer la densité d'un liquide, on prendra un
solide quelconque que l'on suspendra à l'un des plateaux d
lance hydrostatique ; puis, après avoir pesé ce corps, on ch
quelles sont les pertes de poids qu'il éprouve, lorsqu'o
plonger successivement dans l'eau et dans le liquide que l'o
sidère. Ces deux pertes de poids sont les poids d'une masse
et d'une masse de l'autre liquide, ayant toutes deux le mê
volume que le corps solide employé. Si l'on divise la sec
perte de poids par la première, on aura bien le r
d'un certain volume du liquide dont on s'occupe
égal volume d'eau, c'est-à-dire la densité de ce
Le poids d'un volume d'eau égal au volume d
veut trouver la densité varie avec la températur
la densité du corps ne peut-elle être définie exa
tant que l'eau qui sert de terme de comparaison
avoir une température déterminée. Lorsqu'on tro
d'un corps solide ou d'un liquide par les moyens
d'être indiqués, il est nécessaire de corriger le
en raison de ce que la température de l'eau q
n'était pas celle qu'on lui suppose dans la définiti
tés. Nous n'indiquerons pas ici la manière de faire
tion, pour laquelle on peut avoir recours aux traités ue;
nous nous contenterons de dire que, dans un gran e de
circonstances, cette correction ne sera pas nécessaire, et que même, au lieu de se servir d'eau pure, on pourra se servir d'eau ordinaire. L'erreur qui en résultera sera toujours très-petite, et le degré d'approximation avec lequel la densité du corps sera obtenue sera généralement suffisant. C'est ce qui arrivera, par exemple, si l'on cherche la densité d'un corps, pour s'en servir à l'évaluation approximative du poids d'un grand volume de ce corps, ainsi que nous l'avons fait pour l'obélisque du Luxor (§ 146).

§ 271. **Aréomètres.** — Les densités des corps peuvent encore être obtenues à l'aide d'instruments spéciaux, qui sont désignés sous le nom d'*aréomètres.* On distingue les aréomètres *à volume constant*, et les aréomètres *à poids constant.*

Les aréomètres sont en général des instruments disposés de manière à pouvoir flotter, soit sur l'eau, soit sur d'autres liquides. Ceux auxquels on donne le nom d'aréomètres à volume constant doivent être chargés de poids additionnels, de manière à s'enfoncer dans le liquide toujours de la même quantité. La figure 355 représente un de ces aréomètres. Il se compose d'un corps creux et léger A, supportant inférieurement un corps pesant B, et sur-

monté d'une cuvette C qui lui est fixée par une tige déliée. Sur la tige se trouve marqué un point D, qu'on nomme *point d'affleurement*. Lorsqu'on introduit cet aréomètre dans un vase rempli d'eau, il flotte en se plaçant verticalement : cela tient à ce que le corps B, ordinairement de plomb, fait fonction de *lest*, et que le centre de gravité de l'instrument tout entier se trouve plus près de ce corps que le centre de gravité de l'eau déplacée. Mais tant qu'on n'a pas chargé la cuvette C de certains poids, le point d'affleurement D reste très-notablement au-dessus de la surface de l'eau.

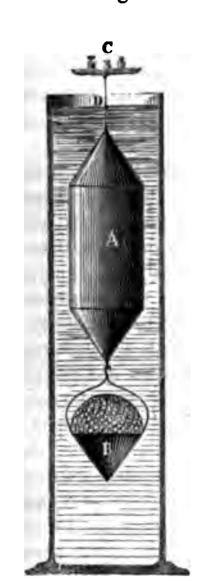


Fig. 355.

Pour employer cet instrument à la détermination de la densité d'un corps solide, on le plonge dans un vase plein d'eau, et l'on charge la cuvette C de poids en quantité convenable pour que le point D soit exactement au niveau de la surface de l'eau : on dit alors que l'instrument est affleuré. On pose ensuite, sur la cuvette, le corps dont on veut trouver la densité, et l'on enlève en même temps des poids, de manière que l'affleurement subsiste. Il est bien évident que les poids qu'on a enlevés représentent le poids du corps, qui se trouve ainsi déterminé tout aussi bien qu'avec une balance. Cela fait, on retire le corps de la cuvette, et on l'introduit au-dessus du lest B, dans une espèce de panier destiné à le contenir. L'affleurement se trouve détruit par là, puisque le corps, actuellement au milieu de l'eau, y perd une portion de son poids égale au poids de l'eau qu'il déplace; on rétablit cet affleurement en ajoutant des poids sur la cuvette, et ces poids, qu'on est obligé d'ajouter, représentent le poids d'une quantité d'eau ayant le même volume que le corps. On a donc trouvé : 1° le poids du corps; 2° le poids d'un égal volume d'eau : il suffit de diviser le premier nombre par le second, pour avoir la densité du corps.

Il est bon d'observer que l'instrument est doué d'une sensibilité d'autant plus grande, et fournit en conséquence des résultats d'autant plus exacts, que la tige sur laquelle est marqué le point d'affleurement D est plus déliée. On voit en effet que, si l'on ajoute un petit poids sur la cuvette, l'aréomètre doit s'enfoncer dans l'eau, de manière à déplacer une nouvelle quantité d'eau dont le poids

soit égal au poids qu'on a ajouté. Mais l'aréomètre, en s'enfonçant, lorsqu'il est à peu près affleuré, ne déplace une nouvelle quantité d'eau qu'en raison de ce qu'une portion de sa tige s'abaisse au-dessous de la surface de l'eau ; l'enfoncement produit par une même augmentation de poids de l'instrument sera donc d'autant plus grand que la section transversale de cette tige sera plus petite. Si, par exemple, la surface de cette section transversale était égale à 1 millimètre carré, une addition de 1 milligramme sur la cuvette ferait enfoncer la tige d'une longueur de 1 millimètre : puisque, par là, le volume d'eau déplacé augmenterait de 1 millimètre cube, et qu'un pareil volume d'eau pèse 1 milligramme.

Pour employer le même instrument à la détermination de la densité d'un liquide autre que l'eau, on le plongera successivement dans l'eau et dans ce liquide, en ayant soin de produire l'affleurement, dans chacun des cas, à l'aide de poids placés sur la cuvette. En ajoutant le poids de l'aréomètre lui-même au poids qu'on a dû mettre sur la cuvette pour l'affleurer, lorsqu'il était dans l'eau, on aura le poids de l'eau déplacée par l'instrument, dans cette circonstance. Le poids d'un égal volume du liquide dont on veut trouver la densité s'obtiendra de même en ajoutant le poids de l'aréomètre au poids dont on a dû le charger pour l'affleurer dans ce liquide. En divisant le second cas de ces deux résultats par le premier, on aura la densité cherchée.

§ 272. Les aréomètres à poids constant servent uniquement à faire connaître la densité des liquides, et sont souvent désignés sous le nom de *pèse-liqueurs*. Ils sont ordinairement de verre, et sont formés d'une partie renflée et creuse *a* (fig. 356), d'une tige graduée *b* qui la surmonte, et d'une boule inférieure *c* contenant du mercure qui fait fonction de lest. Un pareil instrument, étant introduit dans un liquide, ne s'y enfonce pas complétement ; il flotte à la surface, et se maintient verticalement. Il faut, pour qu'il soit en équilibre, que le poids du liquide qu'il déplace soit égal à son propre poids. Il s'enfoncera donc d'autant moins dans le liquide, que celui-ci sera plus dense ; et l'on conçoit que la densité du liquide pourra être indiquée par le point de la tige *b* qui s'arrêtera au niveau de la surface libre de ce liquide.



Fig. 356.

Le mode de graduation de la tige *b* d'un aréomètre à poids constant varie beaucoup suivant les usages auxquels l'aréomètre

est destiné. S'il doit donner immédiatement la densité d'un liquide, on marque, à côté de chaque division de la tige, la densité du liquide dans lequel l'instrument s'enfonce jusqu'à cette division. S'il doit servir à indiquer la proportion plus ou moins grande d'eau qu'on a introduite dans du lait, ce qui fait varier en conséquence la densité de ce liquide, on marque sur la tige les points où l'instrument s'affleure, lorsqu'il est plongé dans du lait contenant moitié, un tiers, un quart..... d'eau.

Un grand nombre d'aréomètres, en usage dans le commerce, sont gradués d'après des règles de pure convention, indiquées par Baumé, et sont désignés sous le nom d'*aréomètres de Baumé*. Ces aréomètres sont de deux espèces, suivant qu'ils servent à *peser* des liquides plus denses ou moins denses que l'eau. Pour graduer les premiers, ceux qui servent aux liquides plus denses que l'eau, on les met dans l'eau, et l'on marque zéro au point d'affleurement ; on les met ensuite dans un liquide formé par la dissolution de 15 parties de sel marin dans 85 parties d'eau, et l'on marque 15 au point d'affleurement ; enfin on divise l'intervalle de ces deux points en 15 parties égales, que l'on nomme *degrés*, et l'on prolonge cette division au-dessous du poids qui porte le 15ᵉ degré, jusqu'à l'extrémité inférieure du tube. Pour graduer les aréomètres destinés aux liquides moins denses que l'eau, on les met dans une dissolution formée de 10 parties de sel marin et de 90 parties d'eau, et l'on marque zéro au point d'affleurement ; on les introduit ensuite dans l'eau pure, et l'on marque 10 au point d'affleurement ; enfin on divise l'intervalle compris entre ces deux points en 10 parties égales que l'on nomme aussi degrés, et l'on prolonge la division jusqu'à l'extrémité supérieure du tube.

§ 273. **Navigation.** — Les bateaux et les navires, dont on se sert pour effectuer les transports par eau, sont des corps flottants qui sont soutenus à la surface de l'eau par la poussée que le liquide exerce sur toute la partie immergée de leur surface. Ils doivent donc déplacer une quantité d'eau dont le poids soit égal à leur propre poids. On voit par là qu'il n'y a pas de limite pour le poids qu'on peut donner à un navire, y compris son chargement ; quelque grand que soit son poids, il flottera toujours, pourvu que sa forme lui permette de déplacer une quantité d'eau suffisamment grande.

Pour qu'un navire présente des conditions convenables de stabilité, pour qu'il ne coure pas le risque d'être renversé sur le côté, lorsqu'il a été dérangé de sa position d'équilibre, il est indispensable que son centre de gravité se trouve le plus bas possible. C'est pour cela qu'on place, à la partie inférieure, des matiè-

res pesantes qui constituent le *lest*. Cependant on n généralement amener ainsi le centre de gravité du na situé au-dessous du centre de gravité du liquide qu'il dans la position d'équilibre; il faut donc que la forme soit disposée de telle manière que malgré cette circo favorable à la stabilité de l'équilibre, la poussée du lic toujours à le relever, de quelque côté qu'il ait été l'action d'une cause extérieure (§ 268).

Le *tonnage* d'un navire s'évalue d'après la quantité peut déplacer, sans cesser d'être dans de bonn navigation; c'est-à-dire d'après le poids total c puisque son poids est tou place. L'unité de poids q dan ou le tonneau, qui vaut mmes (§ qu'un navire est de 200 aux, cela veut dire qu peut être porté à 200 000 rammes; ou bien encore marcher en déplaçant 200 mètres cubes d'eau.

A mesure que l'on charge un navire, il s'enfonce d déplacer une nouvelle quantité d'eau, qui soit en r l'accroissement de sa charge. Mais l'enfoncement q ainsi est d'autant plus faible que sa *surface de flottaison* grande : on donne ce nom à l'étendue de la section tale faite dans le navire par la surface libre du liquide gée à son intérieur. Si cette surface était de 100 mètres carrés, un accroissement de 1 000 kilogrammes dans la charge du navire le ferait enfoncer d'un centimètre puisqu'il devrait déplacer un mètre cube d'eau de plus que précédemment, et qu'un cylindre dont la base est de 100 mètres carrés doit avoir une hauteur d'un centimètre, pour que son volume soit d'un mètre cube.

Les exemples numériques qui viennent d'être donnés supposent que l'eau sur laquelle flotte le navire est de l'eau pure ou au moins de l'eau ordinaire; ils sont applicables à la navigation en eau douce. La densité de l'eau de mer est 1 026; un mètre cube de cette eau pèse donc 1 026 kilogrammes, et une masse de la même eau qui pèse une tonne, n'occupe qu'un volume de 0^{mc}, 975. On voit par là de quelle manière les résultats précédents doivent être modifiés, pour pouvoir s'appliquer à la navigation sur mer.

§ 274. Comme exemple remarquable de l'emploi de bateaux pour effectuer des transports, nous citerons le moyen employé anciennement par les Égyptiens pour le transport de leurs obélisques. Lorsqu'un obélisque avait été taillé dans la carrière même d'où l'on voulait l'extraire, on creusait un canal s'étendant sous lui, de manière qu'il ne s'appuyait plus sur le sol que par ses deux

extrémités. Ce canal se remplissait d'eau, lors de la crue du Nil. On amenait alors des bateaux chargés de briques, et on les faisait passer sous l'obélisque (fig. 357); puis on les déchargeait en enlevant les briques. Les bateaux, ainsi allégés, s'élevaient progressivement; mais bientôt ils touchaient la face inférieure de l'obélisque, et ils ne s'élevaient plus que lorsqu'on avait retiré assez de briques pour qu'ils pussent soulever l'obélisque. Le monolithe étant ainsi chargé sur les bateaux, on le transportait facilement à sa destination, où l'on pouvait le déposer, en opérant d'une manière analogue, mais inverse.

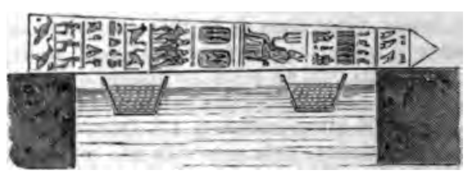


Fig. 357.

§ 275. Lorsqu'un navire, fort *tirant d'eau*, ne peut pas pénétrer dans un port, à cause du manque d'eau, on le soulève à l'aide de bateaux plats nommés *chameaux*, que l'on place de chaque côté. Ces bateaux sont disposés de manière à venir s'adapter contre les flancs du navire. Des câbles que l'on a fait passer sous sa quille se relèvent de part et d'autre, et viennent aboutir à des cabestans fixés sur le pont des chameaux. En manœuvrant ces cabestans, on soulève le navire, dont le poids est porté en partie par les chameaux ; ceux-ci s'enfoncent en même temps; et lorsque le navire a été suffisamment sorti de l'eau, on l'introduit dans le port avec les deux chameaux, comme si le tout ne formait qu'un seul bâtiment. Ce moyen, employé surtout en Hollande, consiste, comme on voit, à diminuer le tirant d'eau du navire, en augmentant sa surface de flottaison par l'adjonction des chameaux. De cette manière le navire déplace plus d'eau, puisque son poids a été augmenté du poids des chameaux ; mais le volume de l'eau déplacée s'étend beaucoup plus dans le sens horizontal, et sa profondeur est moindre que dans le cas où le navire était seul.

§ 276. **Canaux.**— Pour effectuer des transports par eau, dans des contrées où il n'existe pas de rivières navigables, on a creusé des canaux destinés à en tenir lieu. Habituellement l'eau d'un canal est à peu près stagnante, et alors sa surface est plane et horizontale. Quelquefois cependant l'eau coule dans le canal, avec une vitesse comparable à celle que l'on observe dans les rivières, et en conséquence sa surface doit présenter une inclinaison, ainsi que nous le verrons bientôt ; mais cette inclinaison

est toujours extrêmement faible. Il semble donc, au premier abord, qu'on ne puisse établir un canal que dans un pays plat; sans quoi le niveau de l'eau se trouverait, dans certains cas, à une trop grande distance au-dessous de la surface du sol environnant, ce qui présenterait de grands inconvénients de plusieurs sortes. Mais il n'en est rien ; un canal peut être établi dans un pays accidenté, tout aussi bien que dans un pays plat, et être disposé de manière que le niveau de l'eau soit partout à une petite distance de la surface du sol voisin.

Pour arriver à ce résultat, on forme le canal de plusieurs parties, placées à la suite les unes des autres, et dans lesquelles le niveau de l'eau doit être différent ; et l'on réunit ces diverses parties par des *écluses*, qui sont destinées à faire passer les bateaux d'un niveau à un autre. Soient A (fig. 358), le bief supé-

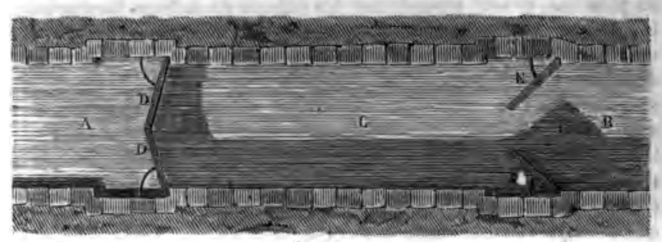


Fig. 358.

rieur, et B le bief inférieur. L'écluse consiste en un bout de canal C, qui est séparé des deux biefs A, B, par des portes D, E, susceptibles de s'ouvrir ou de se fermer à volonté, et qui peut de cette manière être mis en communication avec l'un ou l'autre de ces deux biefs. Les dimensions de l'écluse C, en largeur et en longueur, ont été choisies de manière qu'elle puisse contenir les plus grands bateaux qui doivent naviguer sur le canal. Quant à sa profondeur, elle doit être telle que les bateaux puissent y entrer, lorsque l'eau y est au niveau du bief B ; et ses parois doivent s'élever assez haut, pour ne pas être dépassées par le niveau de l'eau dans le bief A.

Pour faire passer un bateau du bief inférieur B dans le bief supérieur A, on ferme les portes D, et l'on ouvre les portes E. L'eau étant au même niveau en B et en C, on peut amener le bateau à l'intérieur de l'écluse. Alors on ferme les portes E, et l'on établit une communication entre le bief supérieur A et l'écluse ; le niveau de l'eau monte dans l'écluse, et fait monter le bateau avec lui. Lorsque le niveau est devenu le même en C et

en A, on ouvre les portes D, et l'on peut faire passer le bateau dans le bief supérieur.

C'est par une opération inverse qu'on fait passer un bateau de A en B. Les portes E étant fermées, et les portes D ouvertes, le niveau est le même en A et en C : on amène le bateau dans l'écluse, puis on ferme les portes D. On fait alors baisser le niveau de l'eau dans l'écluse, en ouvrant une communication qui permette au liquide de se rendre en B, puis on ouvre les portes E, et enfin on fait passer le bateau en B.

On voit que, chaque fois qu'un bateau traverse l'écluse, soit en montant, soit en descendant, on est obligé de faire couler, du bief supérieur dans le bief inférieur, la quantité d'eau que peut contenir l'écluse entre les niveaux de ces deux biefs. Lorsque plusieurs biefs sont placés à la suite les uns des autres, de plus en plus bas, et sont séparés par des écluses de mêmes dimensions, le passage d'un bateau, de l'une des extrémités du canal à l'autre extrémité, détermine en somme l'écoulement de la quantité d'eau dont nous venons de parler, depuis le bief le plus élevé, jusqu'au bief le plus bas. Lorsqu'un canal doit franchir une montagne, en s'élevant sur un des versants, et s'abaissant sur l'autre versant, il existe vers la crête de la montagne un bief situé au-dessus de tous les autres ; c'est de ce bief que doit s'écouler la quantité d'eau nécessaire au passage des écluses, soit que les bateaux montent d'un côté, soit qu'ils redescendent de l'autre. Il faut donc que ce bief culminant soit alimenté, ou par un cours d'eau, ou par les eaux pluviales qu'on accumule à cet effet dans d'immenses réservoirs. C'est pour diminuer autant qu'on le peut la perte d'eau qui résulte du passage des bateaux par les écluses, qu'on donne à celles-ci les plus petites dimensions possibles, sans que cependant elles cessent de pouvoir contenir les plus grands bateaux qui marchent sur le canal.

§ 277. Nous avons dit que, lorsqu'un bateau avait été amené du bief inférieur B dans l'écluse C, on devait fermer les portes E, puis établir une communication entre l'écluse et le bief supérieur A, pour que le niveau de l'eau devienne le même de part et d'autre des portes D. On pourrait croire qu'il n'y a pas autre chose à faire que d'ouvrir ces portes D; il est évident en effet que, si on les ouvrait, l'écluse s'emplirait, et le bateau serait élevé immédiatement au niveau du bief supérieur. Mais si l'on y réfléchit, on verra qu'il serait extrêmement difficile d'ouvrir les portes D, avant que l'égalité de niveau fût établie de part et d'autre. Admettons, pour fixer les idées, que chaque porte ait 2 mètres de hauteur, et autant de largeur. Si elle est touchée

dans toute sa hauteur par l'eau du bief supérieur, et que le niveau de l'eau dans l'écluse ne l'atteigne en aucun point, elle aura à supporter de la part du liquide (§ 222) une pression égale au poids d'un cylindre d'eau dont la base serait de 4 mètres carrés (surface de la porte), et dont la hauteur serait de 1 mètre (hauteur du niveau de l'eau, au-dessus du centre de gravité de la surface pressée). Cette pression, qui sera de 4 000^k, produira le même effet qu'une force de même intensité appliquée en un point de la porte situé sur la verticale qui passe par son milieu, et au tiers de cette ligne à partir de son côté inférieur (§ 223). On voit par là qu'on ne pourrait ouvrir la porte dont il s'agit, et vaincre la pression qui la maintient fermée, qu'en lui appliquant une force extrêmement grande. Pour que les deux portes puissent résister à une si énorme pression, on les construit avec une grande



Fig. 359.

solidité, et on les dispose de manière qu'elles s'arc-boutent l'une contre l'autre lorsqu'elles sont fermées (fig. 358); par ce moyen, on voit que les portes ne pourraient céder à l'action du liquide qu'en écartant les massifs de maçonnerie qui forment les deux côtés de l'écluse.

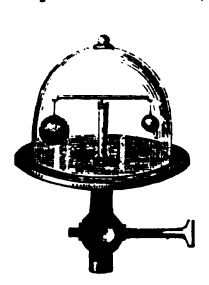
Pour éviter d'avoir à vaincre la résistance extrêmement grande dont nous venons de parler, on n'ouvre les portes d'écluse qu'après avoir amené le niveau à être le même sur leurs deux faces. A cet effet, on ouvre d'abord une sorte de vanne qui ferme une ouverture pratiquée vers la partie inférieure de chaque porte.

Cette vanne est fixée à une crémaillère de fer, qui monte verticalement jusqu'au-dessus de la porte; un pignon engrène avec cette crémaillère, et l'axe du pignon est muni d'une manivelle. En faisant tourner la manivelle, on soulève la vanne sans peine (fig. 359); l'eau du bief supérieur se précipite dans l'écluse par l'ouverture qui lui est ainsi offerte; le niveau de l'eau s'élève progressivement dans l'écluse, et lorsqu'il est devenu le même que le niveau dans le bief supérieur, on peut ouvrir les portes.

Les portes qui existent entre l'écluse et le bief inférieur présentent une disposition entièrement pareille, afin qu'on puisse faire écouler l'eau de l'écluse dans le bief inférieur, avant qu'on les ouvre.

§ 278. **Influence de l'air sur le poids d'un corps.** — Tous les corps qui nous environnent sont placés au milieu de l'air atmosphérique. Cet air exerce une pression sur chaque partie de leur surface; ils se trouvent donc dans des conditions analogues à celles d'un corps plongé dans un liquide. Aussi peut-on répéter dans ce cas le raisonnement du § 264, et l'on en conclura qu'un corps, placé au milieu de l'air atmosphérique, perd une portion de son poids égale au poids de l'air qu'il déplace.

On peut vérifier ce résultat par l'expérience suivante. Deux boules de cuivre, dont l'une est creuse, et l'autre pleine, ont été disposées de telle manière qu'étant suspendues aux extrémités d'un petit fléau de balance (fig. 360), elles se fassent équilibre, et que le fléau reste horizontal. On introduit le tout sous le récipient d'une machine pneumatique, et on fait le vide. On voit alors que l'équilibre n'existe plus; la boule creuse, qui est plus grosse que l'autre, s'abaisse et fait monter la boule pleine. Cela tient à ce que chaque boule perdait dans l'air une portion de son poids égale au poids de l'air qu'elle déplaçait. La plus grosse des deux boules, déplaçant plus d'air que l'autre, éprouvait en même temps une plus forte diminution de poids qu'elle, et puisque les poids des deux boules, ainsi diminués de quantités inégales, se faisaient équilibre en agissant aux extrémités de deux bras de levier égaux, il s'ensuit que le poids de la plus grosse des deux boules est réellement plus grand que celui de la petite. L'équilibre ne doit donc plus exister, lorsqu'on retire l'air qui les enveloppe, et qu'on les soustrait ainsi à la poussée qu'il exerçait sur elles.


Fig. 360.

Lorsqu'on effectue des pesées destinées à fournir des résultats d'une grande précision, il est nécessaire de tenir compte de la diminution de poids que chaque corps éprouve, en raison de la quantité d'air qu'il déplace. Mais cette diminution est très-faible, puisqu'un litre d'air, pris à la température de 0° et sous la pression de $0^m,76$ de mercure, pèse $1^{gr},3$; aussi, dans la plupart des cas, peut-on la négliger et regarder le poids d'un corps dans l'air comme étant le même que si le corps était dans le vide.

§ 279. **Aérostats.** — Puisqu'un corps placé au milieu de l'atmosphère y éprouve de la part de l'air une poussée, de bas en haut, égale au poids de l'air qu'il déplace, on conçoit que ce corps puisse se maintenir dans la position qu'il occupe, sans tomber; il suffit en effet que son poids soit précisément égal à la poussée que l'air environnant exerce sur sa surface. C'est ce qui arrive pour les nuages, qui ne se maintiennent à une certaine hauteur au-dessus de la terre que parce qu'ils sont soutenus par l'air. Si l'air atmosphérique était anéanti, les nuages tomberaient à l'instant même, tout aussi bien qu'une pierre ou une balle de plomb.

Si le poids d'un corps est moindre que le poids de l'air qu'il déplace, la force qui tend à le faire monter l'emporte sur celle qui tend à la faire descendre; il doit donc s'élever dans l'atmosphère, de même qu'un morceau de liége, qu'on a placé au milieu de l'eau, remonte à la surface, aussitôt qu'on l'abandonne à lui-même. C'est de cette manière que nous voyons la fumée s'élever dans l'air; les gaz, dont elle est en grande partie formée, se sont dilatés par l'action de la chaleur, et il en résulte que sa densité est moins grande que celle de l'air environnant, ou bien encore que son poids est plus faible que le poids de l'air qu'elle déplace.

Montgolfier eut l'idée de profiter de la force ascensionnelle de la fumée, pour élever, dans l'atmosphère, des corps pesants et même des hommes. Il construisit pour cela une enveloppe sphérique de grande dimension, fermée de toutes parts, excepté à la partie intérieure, où elle présentait une ouverture circulaire; faisant ensuite un feu de paille au-dessous de cette ouverture, il vit son appareil s'élever à une grande hauteur, puis retomber au bout de quelque temps. L'expérience en fut faite publiquement, pour la première fois, à Annonay, le 5 juin 1783. C'est de cette époque que date la découverte des *aérostats* ou *ballons*.

Si le poids de la *montgolfière* (c'est le nom qu'on donne à l'aérostat inventé par Montgolfier), en y comprenant le poids du gaz qu'elle contient, est notablement inférieur au poids de l'air qu'elle déplace, elle sera capable d'enlever avec elle différents corps qu'on aura

suspendus à sa partie inférieure; l'expérience en fut faite plusieurs fois, et réussit complétement. Bientôt des hommes se décidèrent à se faire élever eux-mêmes dans l'atmosphère. Les premiers qui entreprirent ce voyage d'un nouveau genre sont Pilâtre des Roziers et le marquis d'Arlandes. Leur montgolfière (fig. 361),



Fig. 361.

magnifiquement ornée, se terminait inférieurement par une galerie circulaire destinée à recevoir les voyageurs. Un réchaud était suspendu intérieurement et à leur portée; en sorte qu'ils pouvaient, pendant leur voyage, y jeter de temps en temps de la paille, dont ils avaient une provision, afin de rendre à leur machine la force ascensionnelle que le refroidissement lui faisait perdre. Cette ascension mémorable eut lieu sans accident, le 21 [illegible]re 1783, dans le jardin de la Muette, près Paris.

§ 280. Au lieu de remplir l'intérieur du ballon avec de la fumée ou de l'air chaud, on peut y introduire un gaz naturellement plus léger que l'air, tel que l'hydrogène. Cette idée, qui remonte à Montgolfier, fut mise en pratique par Charles, qui en fit une première expérience publique à Paris, au Champ de Mars, le 27 août 1783. Le 1er décembre suivant, il s'éleva lui-même dans l'atmosphère, accompagné de Robert, au moyen d'un ballon à gaz hydrogène.

Cette nouvelle espèce d'aérostats présente des avantages marqués sur les montgolfières. D'une part, la légèreté relative du gaz intérieur n'a pas besoin d'être entretenue par un foyer placé vers le bas; et par suite on peut prolonger un voyage aréostatique, sans être obligé de porter avec soi une grande quantité de matières combustibles, comme cela arrive lorsqu'on se sert d'une montgolfière. D'une autre part, la présence de ce foyer au-dessous d'une montgolfière peut occasionner un incendie, dont les effets seraient terribles; la suppression de ce foyer est donc, sous ce point de vue, d'une très-grande importance.



Fig. 362.

Lorsqu'un ballon de cette espèce est destiné à recevoir des voyageurs, on l'enveloppe d'un filet solide qui le recouvre presque complétement excepté à sa partie inférieure (fig. 362). Ce filet se termine par des cordes qui descendent tout autour et soutiennent, au-dessous du ballon, la nacelle où se placent les aéronautes.

Si le ballon était complétement rempli de gaz à la pression atmosphérique, au moment du départ, et que ce gaz ne pût en sortir par aucun moyen, il pourrait en résulter de très-graves accidents. A mesure que le ballon s'élève, il se place dans des couches de l'atmosphère où la pression de l'air est de plus en plus faible. La pression que le ballon supporte extérieurement de la part de l'air diminue donc progressivement, tandis que la pression intérieure, produite par la force élastique du gaz qui y serait renfermé ne changerait pas d'intensité. L'enveloppe, qui était d'abord également pressée sur ses deux faces, se trouverait donc alors soumise, de part et d'autre, à des pressions très-différentes; cela

pourrait déterminer des déchirures de cette enveloppe, ce qui permettrait au gaz de sortir en abondance, et par suite obligerait bientôt le ballon à retomber sur la terre.

Pour obvier à ces graves inconvénients, on peut employer deux moyens différents. Le premier consiste à ne pas emplir complétement le ballon au moment du départ. Lorsqu'il s'élève, et que la pression qu'il supporte extérieurement diminue, le gaz qu'il contient se dilate, et le ballon se gonfle peu à peu : il est clair que, tant qu'il n'a pas pris ainsi tout le volume qu'il est susceptible de prendre, il n'y a pas à craindre de déchirure occasionnée par un excès de pression intérieure. Le second moyen, qui est presque exclusivement adopté maintenant, consiste à laisser une libre issue au gaz à la partie inférieure du ballon; de telle manière que, le gaz communiquant constamment avec l'air extérieur par cette issue, on ne doit pas avoir à craindre que la pression intérieure surpasse notablement celle du dehors. En outre, dans l'un et l'autre cas, on a toujours soin de pratiquer, au sommet du ballon, une ouverture assez large, fermée par une soupape. Cette soupape, qu'un ressort maintient bien en contact avec les bords de l'ouverture, peut être ouverte à l'aide d'une corde qui y est attachée et qui descend jusqu'à la portée des voyageurs. Si l'on craint que la pression intérieure ne surpasse trop la pression extérieure, soit que le ballon n'ait pas d'ouverture vers le bas, soit que cette ouverture se trouve accidentellement insuffisante pour laisser sortir une quantité convenable de gaz, on ouvre la soupape, jusqu'à ce qu'il se soit établi un équilibre de pression qui enlève toute chance d'accident.

La force ascensionnelle d'un ballon entièrement gonflé diminue à mesure qu'il se trouve plus élevé dans l'atmosphère; car l'air qu'il déplace a une densité de plus en plus faible, et le poids de cet air est en conséquence de plus en plus petit. Il est vrai que, comme nous venons de le dire, une portion du gaz sort par l'ouverture qui est pratiquée au bas du ballon, ou bien par la soupape supérieure, et cela amène une diminution correspondante dans le poids total du ballon ; mais cette perte de poids ne compense pas la diminution de la poussée du fluide environnant. Il arrive bientôt un moment où la force ascensionnelle est complétement annulée, et le ballon reste alors stationnaire dans la couche où il se trouve; ou du moins il ne se meut plus que dans le sens horizontal, emporté par le courant qui existe dans cette couche. Pour faire monter le ballon plus haut, on allége la nacelle, en jetant du *lest*, c'est-à-dire du sable fin, dont on a soin de se munir en quantité convenable. Pour le

faire descendre, au contraire, on ouvre la soupape pendant quelque temps, le gaz sort, le ballon se dégonfle ; et la poussée de l'atmosphère, qui diminue plus que ne fait le poids du ballon, en raison de la perte de gaz, devient insuffisante pour le soutenir à la même hauteur.

§ 281. Il est aisé de calculer la force ascensionnelle d'un ballon, d'après ses dimensions, son poids et la nature du gaz dont on le remplit. Le poids d'un mètre cube d'hydrogène, à la température de 0°, et sous la pression de 0m,76 de mercure, est de 89gr ; le poids d'un même volume d'air, dans les mêmes c
stances, est de 1 299gr ; la force ascensionnelle d'un mè
d'hydrogène, placé au milieu de l'air atmosphérique,
1 210gr. Pour trouver la force ascensionnelle d'un b
avec l'hydrogène, on devra donc multiplier 1 210gr pa
bre de mètres cubes de gaz qu'on aura employés, et re
du produit le poids du ballon lui-même, avec le filet
celle : on jugera ainsi de la grandeur du poids dont la
pourra être chargée, sans que le ballon cesse de pouvoir

Si l'on remplit le ballon de gaz hydrogène carboné
l'éclairage, comme on le pratique habituellement, à ca
plus grande facilité de se procurer ce gaz, on ne pourra c
la nacelle que d'un poids beaucoup plus faible. La densité d
gaz, pris dans le gazomètre, est très-variable, parce que sa composition n'est pas toujours la même ; mais on peut la regarder en moyenne comme étant les 0,53 de celle de l'air. Un mètre cube de gaz d'éclairage, dans les mêmes circonstances de température et de pression que ci-dessus, pèse donc environ 688gr ; et la force ascensionnelle dont il est animé, lorsqu'il est placé au milieu de l'air atmosphérique, est d'environ 611gr. En multipliant cette force par le nombre de mètres cubes de gaz employés, et retranchant du produit le poids du ballon, du filet et de la nacelle, on aura encore la mesure du poids que le ballon peut enlever. On voit que la force ascensionnelle d'un mètre cube de gaz d'éclairage est à peu près la moitié de celle d'un même volume d'hydrogène.

PRINCIPES RELATIFS AU MOUVEMENT DES FLUIDES.

§ 282. **Écoulement d'un liquide par un orifice.** — Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase, et qu'on vient à pratiquer une ouverture dans la paroi du vase, au-dessous de la surface libre du liquide, l'équilibre est troublé. La portion de paroi qui a été enlevée pour produire l'ouverture était plus pressée à

l'intérieur qu'à l'extérieur, en raison de sa distance verticale à la surface libre du liquide ; elle résistait à cette pression et maintenait ainsi le liquide dans l'immobilité : mais aussitôt qu'elle est enlevée, le liquide, qui n'est plus retenu par rien, se précipite par l'orifice qui lui est offert.

Au moment où l'écoulement commence, les molécules liquides, qui étaient immobiles un instant auparavant, ne traversent l'orifice qu'avec une très-petite vitesse ; cette vitesse d'écoulement augmente progressivement, et finit au bout de très-peu de temps par atteindre une grandeur qu'elle ne dépasse plus. Alors l'écoulement devient régulier ; les molécules liquides qui sont à l'intérieur du vase sont toutes en mouvement pour se rapprocher de l'orifice : chacune d'elles suit un chemin particulier, et prend généralement une vitesse de plus en plus grande, jusqu'à ce qu'elle soit arrivée à l'orifice. Si l'on considère les diverses molécules liquides qui marchent à la suite les unes des autres, en suivant le même chemin, ces molécules constituent ce que l'on nomme un *filet liquide*.

La théorie indique que la vitesse avec laquelle le liquide traverse l'orifice, lorsque le mouvement est devenu régulier, ne dépend pas de la direction de la portion de paroi dans laquelle cet orifice a été pratiqué. Que l'écoulement se produise de haut en bas (fig. 363), ou de bas en haut (fig. 364), ou latéralement (fig. 365), la vitesse de cet écoulement doit toujours être la même, si la distance verticale AB de la surface libre du liquide au-dessus de l'orifice est la même. La théorie fait voir de plus que cette vitesse est égale à celle qu'acquerrait un corps pesant, en tombant librement d'une hauteur égale à AB. En sorte que, si l'on désigne par h cette hauteur AB exprimée en mètres, et par v la vitesse d'écoulement, on aura (§ 88)

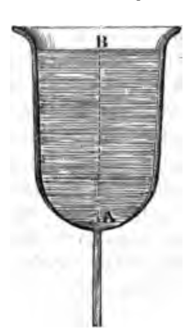


Fig. 363.

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Cette formule donnera la vitesse en mètres; c'est-à-dire qu'elle fera connaître le nombre de mètres que parcourrait chaque molécule liquide en une seconde, si elle continuait à se mouvoir avec la même rapidité pendant ce temps, à partir du moment où elle a traversé l'orifice. Nous avons donné précédemment (§ 89) les résultats numériques qui se déduisent de la formule, pour un grand nombre de valeurs de la hauteur h.

§ 283. On peut vérifier par l'expérience que la vitesse d'écoulement d'un liquide est bien celle que la théorie indique. Lorsque l'écoulement a lieu de bas en haut, comme dans la figure 364, on observe que le jet liquide qui se produit au-dessus de l'orifice s'élève à peu près jusqu'au niveau du liquide dans le vase. Il ne peut en être ainsi qu'autant que les molécules qui traversent l'orifice d'écoulement sont lancées avec une vitesse égale à celle qu est due à la hauteur du niveau du liquide au-dessus de l'orifice. Pour que l'expérience se fasse d'une manière plus complète, il est bon que le jet liquide soit un peu incliné; sans cela les molécules liquides après s'être élevées jusqu'à la plus grande hauteur qu'elles peuvent atteindre, retomberaient sur les molécules suivantes, et diminueraient en conséquence leur vitesse ascendante; le jet du liquide ne s'élèverait donc pas de toute la hauteur qui correspond à la vitesse d'écoulement. En dirigeant le jet un peu obliquement, on diminuera bien d'une petite quantité la hauteur à laquelle chaque molécule pourra s'élever en vertu de sa vitesse acquise (§ 107); mais cet inconvénient sera plus que compensé par l'avantage de faire décrire une parabole à chaque molécule, et d'empêcher ainsi qu'en retombant elle ne vienne arrêter les molécules qui la suivent.



Fig. 364.

Lorsque l'écoulement a lieu latéralement, par un orifice percé dans une paroi verticale, (fig. 365), le jet liquide prend la figure d'une parabole ; la courbe qu'il forme n'est autre chose que celle que décrirait un corps pesant lancé horizontalement avec une vitesse égale à celle que possède le liquide en sortant du vase. La forme du jet liquide doit donc pouvoir servir à la détermination de la vitesse d'écoulement. Pour cela, on mesurera la distance horizontale CD d'un point du jet parabolique, à la verticale qui passe par l'orifice, et la différence de niveau AD de l'orifice et

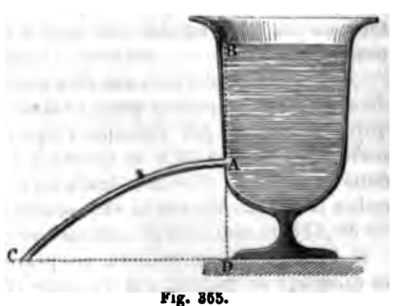


Fig. 365.

du point C. Le temps employé par une molécule liquide, pour aller de A en C, est précisément égal à celui qu'elle emploierait à tomber verticalement de la hauteur AD (§ 105). Si AD est égal à $\frac{1}{2}g$, ou à $4^m,9$, ce temps sera de 1 seconde; il sera de $\frac{1}{2}$ seconde, $\frac{1}{3}$ de seconde, $\frac{1}{4}$ de seconde,.... si AD est égal à $\frac{1}{4}$, ou $\frac{1}{9}$, ou $\frac{1}{16}$,....., de $4^m,9$. Admettons, pour fixer les idées, que l'on ait choisi le point C sur le jet parabolique, de manière que AD soit égal à $\frac{1}{9}$ de $4^m,9$, c'est-à-dire égal à $0^m,544$: une molécule liquide aura mis $\frac{1}{3}$ de seconde pour aller de A en C. Mais si la pesanteur n'avait pas agi sur elle depuis le moment où elle est sortie de l'orifice, elle se serait mue horizontalement, d'un mouvement uniforme, et aurait ainsi parcouru une distance égale à CD en $\frac{1}{3}$ de seconde (§ 105) : donc la vitesse avec laquelle elle sort du vase est égale à 3 fois la longueur CD. En déterminant par ce moyen la vitesse d'écoulement d'un liquide, pour diverses hauteurs du niveau supérieur au-dessus de l'orifice, on trouve que cette vitesse est bien à très-peu près égale à celle que donnerait la formule $v = \sqrt{2gh}$, dans ces différents cas.

§ 284. La quantité de liquide qui traverse l'orifice pendant une seconde, ou ce que l'on nomme la *dépense*, dépend à la fois de la grandeur de l'orifice et de la vitesse d'écoulement. Si le liquide, après sa sortie du vase, était soustrait à l'action de la pesanteur, et ne se mouvait qu'en vertu de sa vitesse acquise, la quantité de ce liquide qui sort pendant une seconde formerait un cylindre ayant pour hauteur la vitesse d'écoulement. En regardant l'orifice comme étant la base de ce cylindre, on voit qu'on aurait la dépense en multipliant l'aire de cet orifice par la vitesse d'écoulement. Or il est clair que la dépense ainsi obtenue convient aussi bien au cas où le liquide continue à être soumis à l'action de la pesanteur, après avoir traversé l'orifice : car les conditions de l'écoulement ne doivent pas être modifiées par les circonstances diverses dans lesquelles peut se trouver le liquide, après qu'il a quitté le vase. Si par exemple l'aire de l'orifice est de 2 centimètres carrés, et qu'il se trouve à $0^m,50$ au-dessous du niveau dans le vase, la dépense devra être égale à 626,4 centimètres cubes ($2 \times 313,2$) ; car la vitesse due à une hauteur de $0^m,50$ est de $3^m,132$ ou bien 313,2 centimètres (§ 89).

Si l'orifice d'écoulement a été pratiqué dans une paroi mince, la quantité de liquide qui s'écoule réellement en une seconde est de beaucoup inférieure à celle que l'on trouve par le moyen qui vient d'être indiqué ; la *dépense effective* n'est guère que les 0,62 de la *dépense théorique*, c'est-à-dire de la dépense obtenue en multipliant l'aire de l'orifice par la vitesse d'écoulement.

Voyons à quoi doit être attribuée cette différence considéral
Nous avons dit que, si le liquide était soustrait ... pesanteur, après sa sortie du vase, la quantité de ... sort pendant une seconde formerait un cylindre a... teur la vitesse d'écoulement ; puis nous avons év... ...olume de ce cylindre, en regardant sa base comme étan... ...e à l'orifice. C'est dans ce dernier point que nous avons co... une erreur : la base de notre cylindre liquide est très-nota...ment plus petite que nous ne l'avons supposé. Les différents f... ...iquides. à l'intérieur du vase, convergent vers l'orifice d... ...lemen leur convergence ne disparaît pas brusquement au ...ment ils l'atteignent : elle persiste encore jusqu'à une certaine distan au delà. Il en résulte que la veine fluide ne présente pas, à origine, la figure d'un cylindre ; elle se contracte d'abord bientôt devient sensiblement cylindrique. Ce que nous prendre pour la base du cylindre dont nous avons par haut, ce n'est donc pas l'aire de l'orifice, mais l'aire de la *concentrée* de la veine fluide. On conçoit par là commen fait que la dépense effective soit si différente de la dépen... rique, telle que nous l'avions trouvée. Cependant, malgré l... que nous avons commise dans notre raisonnement, pour ... à trouver la quantité de liquide qui s'écoule dans une sec... nous conserverons, suivant l'usage, le nom de dépense théoriq... au produit de l'aire de l'orifice par la vitesse d'écoulement ... liquide.

Des mesures prises sur différentes veines fluides, sortant d'orifices circulaires percés en minces parois, on fait reconnaître qu'on peut adopter en moyenne les résultats suivants. Si le diamètre *ab* de l'orifice (fig. 366), est divisé en 10 parties égales, le diamètre *cd* de la section contractée contiendra 8 de ces parties, et la distance *ef* de cette section à l'orifice en contiendra 5. L'aire de la section contractée est donc moyennement les 0,64 de l'aire de l'orifice ; et si l'on multiplie cette aire par la vitesse de l'écoulement, on trouvera un résultat qui sera sensiblement le même que celui qui est fourni par la mesure directe de la quantité de liquide écoulé.

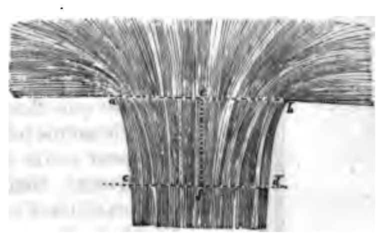


Fig. 366.

§ 285. A partir de la section contractée, la veine liquide prend

des formes diverses, suivant la direction dans laquelle se fait l'écoulement ; considérons spécialement une veine verticale correspondant à un orifice pratiqué à la partie inférieure d'un vase. Nous avons dit que la veine liquide, après s'être contractée d'une manière notable, jusqu'à une petite distance de l'orifice, devient ensuite sensiblement cylindrique; en réalité cela n'arrive pas exactement pour la veine dont nous nous occupons. Les sections transversales de cette veine diminuent toujours, à mesure qu'elles sont faites plus loin de l'orifice ; la veine liquide se contracte toujours, jusqu'au moment où elle se divise en gouttes. Mais cette contraction, qui existe dans toute la longueur de la veine, est due à une tout autre cause que celle qui se produit tout près de l'orifice : elle est beaucoup moins sensible que cette contraction initiale, et à l'inspection de la veine, on distingue très-bien le point où finit l'une et où commence l'autre.



Fig. 367.

Pour nous rendre compte de la manière dont la forme de la veine se modifie d'un point à un autre, imaginons que des molécules isolées sortent successivement de l'orifice avec des vitesses égales, et qu'elles se succèdent à des intervalles de temps égaux entre eux, d'un dixième de seconde, par exemple. Ces molécules descendront toutes suivant la même verticale, et la distance de deux d'entre elles ira constamment en augmentant; puisque leurs vitesses augmentent, et que chacune d'elles emploiera toujours le même temps, un dixième de seconde, pour venir prendre la place qu'occupe la suivante. Dans l'écoulement du liquide, les quantités d'eau qui sortent de l'orifice, pendant chaque dixième de seconde, sont égales entre elles ; si ces quantités d'eau se séparaient, de manière à faire des gouttes isolées, elles descendraient en s'éloignant progressivement les unes des autres, comme le

faisaient les molécules isolées dont nous venons de parler. Mais les masses d'eau qui sortent ainsi successivement de l'orifice, pendant chaque dixième de seconde, ne se quittent pas; elles restent adhérentes les unes aux autres, de manière à former une veine continue : et puisque leurs distances mutuelles iraient en augmentant progressivement, si elles étaient isolées, elles ne peuvent rester adhérentes entre elles qu'autant qu'elles s'allongent de plus en plus, à mesure qu'elles descendent. Cet allongement qu'éprouve nécessairement chaque portion de la veine fluide, en s'éloignant de l'orifice, entraîne une diminution correspondante dans sa section transversale : c'est ce qui donne lieu au rétrécissement continuel de la veine fluide dont nous nous occupons, à partir de la section à laquelle nous avons donné le nom de section contractée. La figure 367 peut donner une idée de la forme de cette veine fluide.

S'il n'existait pas de causes particulières qui vinssent modifier la forme d'une veine fluide verticale, telle que nous venons de la trouver, cette veine s'allongerait beaucoup, en s'effilant de plus en plus, et ce n'est qu'à une grande distance de l'orifice qu'elle se diviserait en gouttes. Mais habituellement il se produit, sur la surface de la veine, des ondes pareilles à celles qu'on observe sur la surface d'une eau tranquille, sur laquelle on a laissé tomber une pierre. Ces ondes donnent lieu à des renflements et à des rétrécissements successifs de la veine (fig. 368). Les mouvements vibratoires des molécules liquides, qui déterminent ces renflements et rétrécissements, les

Fig. 368.

font d'ailleurs d'autant mieux ressortir, que la veine liquide est plus mince; et bientôt il arrive qu'en vertu de ces mouvements vibratoires, les renflements de la veine se séparent et forment des gouttes. En évitant autant que possible les causes de vibrations des molécules liquides, on obtient une veine qui reste continue dans une grande longueur; en produisant au contraire des vibrations dans l'air qui environne la veine fluide, à l'aide d'un instrument de musique, par exemple, on voit la veine se raccourcir beaucoup, et se diviser en gouttes à peu de distance de l'orifice d'écoulement.

Des considérations analogues à celles qui viennent d'être développées pour les veines verticales descendantes peuvent être appliquées aux veines verticales ascendantes. On reconnaît ainsi qu'une pareille veine fluide, après s'être contractée à la sortie de l'orifice, en raison de la convergence des filets liquides qui la forment, se dilate ensuite peu à peu, à cause de la diminution de vitesse qu'éprouvent successivement les molécules liquides, à mesure qu'elles s'élèvent. Quant aux vibrations dont nous avons parlé, et qui ont une grande influence sur une veine descendante pour la diviser en gouttes, elles ne produisent que peu d'effet sur une veine ascendante, parce que sa section transversale, augmentant au lieu de diminuer à mesure qu'elle s'éloigne de la section contractée, n'est jamais assez petite pour que l'effet de ces vibrations devienne bien sensible.

§ 286. Ce que nous avons dit, relativement à la vitesse d'écoulement d'nn liquide par un orifice, s'applique indistinctement au cas où l'écoulement aurait lieu dans le vide, et au cas où il se produirait dans l'atmosphère; la vitesse d'écoulement sera toujours la même, quelle que soit la pression exercée sur la surface libre du liquide dans le vase, pourvu que la veine liquide à sa sortie de l'orifice, soit soumise extérieurement à la même pression. Mais la vitesse sera très-différente de celle que nous avons indiquée, si les pressions ne sont pas égales sur la surface libre du liquide et à l'orifice.

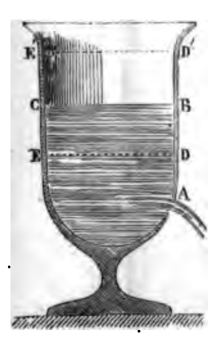


Fig. 369.

Si la pression est plus grande à l'orifice A que sur la surface BC du liquide (fig. 369), l'excès de la première pression sur la seconde devra être inférieur à la pression que produirait une colonne de liquide qui aurait pour hauteur la

distance verticale de l'orifice A à la surface BC; sans cela le liquide ne pourrait pas couler par cet orifice. Menons donc dans le vase un plan horizontal DE, situé au-dessous du plan BC, à une telle distance de ce plan, que le poids d'une colonne de liquide, comprise entre ces deux plans, et ayant pour base l'unité de surface, soit égal à l'excès de pression dont il s'agit. Le liquide n'étant animé que d'un mouvement très-lent dans le vase, en raison de la petitesse que nous supposons toujours à l'orifice, les pressions s'y transmettent à très-peu près de la même manière que si le liquide y était en équilibre. La pression exercée en un quelconque des points du plan DE sera donc égale à celle que supporte la surface BC, augmentée de la différence entre cette dernière pression et celle qui a lieu à l'orifice A; et par suite la pression sera la même sur le plan DE et à l'orifice. Le liquide situé au-dessous du plan DE est donc dans les mêmes conditions que si celui qui est compris entre BC et DE était enlevé, et que l'orifice d'écoulement et la surface libre du liquide restant fussent soumis à des pressions égales. Ainsi la vitesse d'écoulement sera bien encore représentée par la formule $\sqrt{2gh}$, pourvu que l'on prenne pour h la hauteur du plan DE au-dessus de l'orifice.

Si la pression est plus faible sur l'orifice A que sur la surface BC du liquide, on peut concevoir que l'excès de pression sur cette surface BC soit produit par un liquide de même nature que celui qui est dans le vase, disposé au-dessus de cette surface, et se terminant à une surface libre D'E', située à une hauteur convenable. L'écoulement se produit donc de la même manière que si la surface libre du liquide, au lieu d'être en BC, et de supporter une plus forte pression que l'orifice, était en D'E', et supportait la même pression que l'orifice. La formule $\sqrt{2gh}$ donnera donc encore la vitesse d'écoulement du liquide, pourvu que h désigne la distance verticale de l'orifice au niveau idéal D'E'.

On voit, par ce qui précède, qu'une diminution ou une augmentation de pression sur la surface libre du liquide dans le vase, sans que la pression sur l'orifice change, entraîne une diminution ou une augmentation dans la vitesse d'écoulement du liquide. Et, au contraire, une diminution ou une augmentation de la pression sur l'orifice, sans changement de pression sur la surface libre du liquide, détermine une augmentation ou une diminution correspondante dans la vitesse d'écoulement.

§ 287. **Effet des ajutages.** — Lorsqu'on adapte un petit bout du tuyau, cylindrique *ou conique*, à un orifice par lequel un

liquide doit s'écouler, ce bout de tuyau, qu'on nomme un *ajutage*, modifie l'écoulement, et cela d'une manière très-notable. Si un orifice est simplement percé dans une paroi qui présente une certaine épaisseur, il se trouvera, dans les mêmes conditions qu'un orifice percé dans une paroi mince, et muni d'un ajutage dont la longueur serait égale à l'épaisseur de la première paroi. L'épaisseur de la paroi dans laquelle un orifice est pratiqué a donc de l'influence sur l'écoulement d'un liquide par cet orifice; c'est pour cela que nous avons supposé, jusqu'à présent, que l'orifice d'écoulement était percé en mince paroi. Occupons-nous maintenant d'étudier les modifications que peut éprouver l'écoulement d'un liquide par un orifice, en raison de la forme et des dimensions de l'ajutage dont cet orifice est muni.

Lorsque l'ajutage adapté à l'orifice est cylindrique (fig. 370), l'écoulement peut avoir lieu de deux manières différentes. Ou bien la veine liquide traversera cet ajutage sans en toucher les parois ; ou bien elle le traversera en mouillant ses parois dans toute leur étendue. Dans le premier cas, les choses se passent exactement de même que si l'orifice était percé en mince paroi ; la veine se contracte d'abord, puis devient sensiblement cylindrique : elle ne remplit donc pas toute la capacité intérieure de l'ajutage, que l'on pourrait enlever sans modifier l'écoulement en aucune manière. Dans le second cas, qui se produit habituellement, la veine liquide a une forme toute différente de celle qu'elle prendrait sans l'ajutage ; l'adhérence du liquide avec les parois oblige la veine à remplir toute la capacité intérieure de l'ajutage : cette veine, au lieu de se contracter, comme elle ferait si l'orifice était percé en mince paroi, prend donc immédiatement la forme d'un cylindre ayant pour base l'orifice d'écoulement lui-même.



Fig. 370.

Si l'on mesure le liquide qui s'écoule pendant une seconde, par un ajutage cylindrique dont le liquide mouille les parois, on trouve que la dépense est augmentée considérablement par l'effet de l'ajutage ; elle est environ les 0,82 de la dépense théorique (§ 284) ; tandis que, si l'écoulement avait eu lieu par un orifice percé en mince paroi, elle n'en aurait été que les 0,62. On conçoit aisément la cause de cette augmentation de dépense. Nous avons vu que, si la dépense effective est de beaucoup inférieure à la dépense théorique, dans le cas où l'écoulement a lieu par un orifice percé en mince paroi, cela tient à ce que la veine

fluide se contracte, et qu'en conséquence sa section transversale, après la contraction, est très-notablement plus petite que l'orifice qu'elle a traversé. L'ajutage cylindrique ayant pour effet immédiat de s'opposer à la contraction de la veine, il est tout naturel que sa présence détermine une augmentation de dépense. La cause d'erreur, en vertu de laquelle la dépense théorique était trop forte (§ 284) disparaît ici complétement. Mais alors on peut se demander pourquoi la dépense effective, dans le cas d'un ajutage cylindrique, n'est pas égale à la dépense théorique; pourquoi elle n'en est que les 0,82. Cela tient à ce que l'ajutage ne modifie pas seulement la section transversale de la veine, en la ramenant à être égale à l'orifice lui-même; il agit en même temps sur la vitesse du liquide pour la diminuer : la vitesse d'écoulement est rendue plus petite que celle que fournit la formule $v = \sqrt{2gh}$. Pour arriver à ce que nous appelons la dépense théorique, nous avons regardé la quantité de liquide qui traverse l'orifice comme formant un cylindre ayant pour hauteur la vitesse $\sqrt{2gh}$, et pour base l'orifice lui-même. Cette évaluation est inexacte, dans le cas de l'écoulement par un orifice percé en mince paroi, parce que l'on doit prendre pour base du cylindre liquide la section contractée de la veine, et non pas l'orifice. L'ajutage cylindrique ramène la base du cylindre liquide à être égale à l'orifice d'écoulement; mais en même temps il diminue la hauteur de ce cylindre. Cependant la hauteur du cylindre liquide n'est pas diminuée dans le rapport dans lequel sa base est augmentée ; et il en résulte une augmentation réelle de dépense.

Il nous reste maintenant à indiquer la cause de la diminution que l'ajutage cylindrique apporte dans la vitesse d'écoulement du liquide. Nous avons dit que la contraction de la veine liquide, à sa sortie d'un orifice percé en mince paroi, était due à la convergence des filets liquides, au moment où ils se présentent à l'orifice, convergence qu'ils ne perdent complétement qu'à une certaine distance au delà.

L'ajutage cylindrique, en s'opposant à la contraction de la veine, oblige les filets liquides à changer brusquement de direction, aussitôt qu'ils traversent l'orifice. Ces filets sont donc alors dans les mêmes conditions que s'ils éprouvaient un choc, qui leur serait appliqué de manière à produire ce changement brusque de direction. Or nous avons vu que les chocs donnent généralement lieu à des pertes de travail (§ 144). Les molécules liquides, au moment où elles viennent de pénétrer dans l'ajutage, ne doivent donc pas avoir toute la vitesse qu'elles auraient eue sans cette *circonstance: elles doivent* se mouvoir comme si, l'ajutage

n'existant pas, elles étaient descendues d'une moins grande hauteur dans le vase. L'expérience montrant que la dépense effective par un ajutage cylindrique est les 0,82 de la dépense théorique, il en résulte que la vitesse du liquide est diminuée par l'effet de cet ajutage, dans le rapport de 1 à 0,82.

Le changement brusque de direction que prennent les filets liquides, en arrivant dans l'ajutage, ne se produit pas sans que ces filets réagissent sur les parois. Cette réaction, sorte de force centrifuge, donne lieu à une diminution dans la pression que le liquide exercerait sans cela contre ces parois : la pression qu'il exerce en réalité dans l'ajutage, tout près de l'orifice d'entrée AB (fig. 371), est plus petite que la pression atmosphérique. C'est ce qu'on reconnaît aisément, en adaptant à l'ajutage un tube de verre C, qui se recourbe et vient plonger dans un vase contenant du mercure: pendant l'écoulement, on voit le mercure monter dans le tube, et s'y maintenir à une certaine hauteur au-dessus du niveau extérieur. Le passage du liquide dans l'ajutage donne donc lieu à une sorte de succion contre les parois, qui fait monter le mercure dans le tube C, comme si l'on aspirait à l'extrémité supérieure de ce tube.

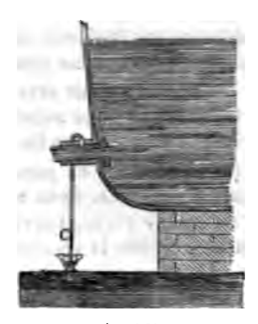


Fig. 371.

§ 288. Les détails dans lesquels nous venons d'entrer, sur l'effet produit par un ajutage cylindrique, vont nous aider à comprendre ce qui se passe, quand un liquide s'écoule par des ajutages de diverses formes.

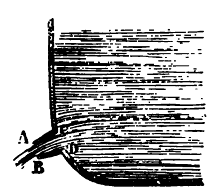


Fig. 372.

Un ajutage conique convergent (fig. 372) a une influence plus ou moins grande sur l'écoulement du liquide, suivant que, pour une même longueur, il y a une différence plus ou moins grande entre les diamètres de ses deux bases. On a cherché par l'expérience quelle forme devait avoir un pareil ajutage, pour que, à égalité d'orifice de sortie AB, la dépense fût le plus grande possible. On a trouvé ainsi que les deux arêtes opposées AC, BD, du cône devaient être inclinées l'une sur l'autre d'un angle de 13 à 14 degrés; c'est d'après cette donnée que la figure 372 a été construite. En employant un pareil ajutage, on n'obtient une dépense effective qui est les 0,95 de la dépense théorique corres-

pondant à l'orifice de sortie AB. On se rend compte aisément de ce résultat, en observant que, d'une part, la veine liquide ne doit se contracter que d'une petite quantité à la sortie de l'orifice AB, puisque les filets liquides ne sont que très-peu convergents ; et que, d'une autre part, la perte de vitesse que le liquide doit éprouver, en raison de ce que les filets changent brusquement de direction à leur entrée dans l'ajutage, est nécessairement moindre que dans le cas d'un ajutage cylindrique, puisque le changement de direction de ces filets est moins prononcé.

Si l'on adapte un ajutage conique divergent à un orifice AB (fig. 373), et que le liquide le traverse en mouillant ses parois, la dépense obtenue peut être plus grande que la dépense théorique correspondant à cet orifice. Ce résultat singulier peut s'expliquer de la manière suivante. A mesure que le liquide marche à l'intérieur de l'ajutage, il traverse des sections de plus en plus grandes ; il doit donc s'étaler progressivement, puisqu'il remplit l'ajutage en totalité ; et par suite sa vitesse doit diminuer, à mesure qu'il s'approche de son extrémité. Cette diminution de vitesse doit être produite par une force agissant en sens contraire du mouvement. Or cette force retardatrice ne peut provenir que des pressions que le liquide supporte ; car la pesanteur n'agit aucunement sur le liquide contenu dans l'ajutage, pour modifier sa vitesse, si cet ajutage a son axe horizontal. Le liquide est soumis à la pression atmosphérique, à sa sortie de l'ajutage ; il éprouve d'ailleurs une pression en sens contraire, de la part du liquide qui sort du vase et qui traverse la section AB : donc il faut que la première pression l'emporte sur la seconde, d'une quantité assez grande pour produire la diminution de la vitesse du liquide qui a lieu dans toute la longueur de l'ajutage. Ainsi le liquide, en s'écoulant par l'orifice AB, supporte, à son passage par cet orifice, une pression plus faible que la pression atmosphérique, qui s'exerce sur la surface libre dans le vase ; cette différence des pressions, sur la surface libre et à l'orifice AB, doit faire prendre au liquide une vitesse d'écoulement plus grande que celle qu'il prendrait si les pressions étaient égales (§ 286). Il y a bien une perte de vitesse, due au changement brusque de direction des filets liquides, au moment où ils pénètrent dans l'ajutage ; mais cette perte est plus que compensée par l'*augmentation* qu'éprouve la vitesse, en

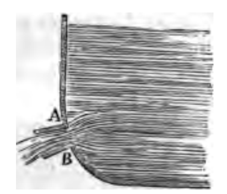


Fig. 373.

raison de la diminution de pression qui a lieu à l'entrée de l'ajutage.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que, si la dépense effective produite par un ajutage conique divergent est plus grande que la dépense théorique correspondant à l'orifice d'entrée, elle est au contraire beaucoup plus petite que celle qui correspond à l'orifice de sortie. La perte de vitesse, résultant de ce que les filets ont éprouvé un changement brusque de direction à leur entrée dans l'ajutage, se fait sentir ici ; et la quantité de liquide qui traverse l'orifice de sortie de l'ajutage est moindre que si les filets étaient arrivés à cet orifice de sortie, sans éprouver de changement brusque dans leur direction.

§ 289. Lorsqu'on veut utiliser la vitesse avec laquelle un liquide s'écoule par un orifice, pour produire certains effets, pour faire mouvoir, par exemple, une roue hydraulique, il est important d'éviter toutes les pertes de vitesse qui sont occasionnées par les changements brusques de direction des filets liquides. Si l'on pouvait pratiquer l'orifice dans une paroi sans épaisseur, ces pertes n'existeraient pas. Mais la paroi doit avoir nécessairement une épaisseur suffisante pour résister à la pression qu'elle a à supporter ; l'orifice qu'on y pratiquera sera donc dans les mêmes conditions qu'un orifice percé en mince paroi, qu'on aurait muni d'un ajutage. Pour éviter les pertes de vitesse qui pourraient résulter du passage du liquide dans cet orifice, on en arrondit les bords vers l'intérieur du réservoir (fig. 374). De cette manière, les filets liquides ne changent que progressivement de direction, et ils sortent du réservoir avec toute la vitesse que peut déterminer la hauteur du niveau au-dessus de l'orifice. Dans ce cas on dit que l'orifice est *évasé*.

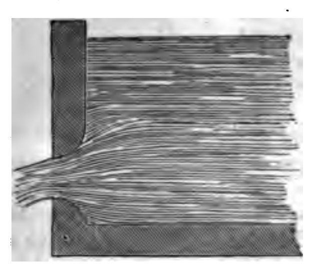


Fig. 374.

§ 290. **Siphon.** — On donne le nom de *siphon* à un tube recourbé ABCD (fig. 375), à l'aide duquel on peut faire passer un liquide, d'un vase M, dans un autre vase N situé plus bas, sans pratiquer d'ouverture dans les parois du premier vase avec lesquelles le liquide est en contact. On commence par remplir complétement ce tube de liquide, puis on le dispose comme l'indique la figure. On voit alors le liquide s'écouler par l'extrémité D du siphon ; le vase M se vide de plus en plus, et l'écoulement ne s'arrête que lorsque le niveau du liquide, dans ce vase M, s'est

abaissé au-dessous de l'extrémité A du siphon. Il faut d'ailleurs, pour que l'écoulement s'entretienne, que l'extrémité D soit toujours au-dessous du niveau du liquide en M.

Pour nous rendre compte de la manière dont l'écoulement peut se produire ainsi, concevons que l'on ait fermé l'extrémité D à

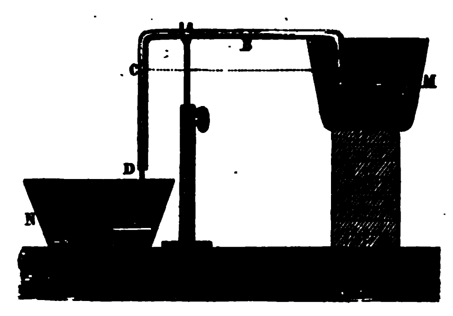


Fig. 375.

l'aide d'un petit piston, et cherchons quelles sont les pressions que ce piston aura à supporter sur ses deux faces. La pression atmosphérique s'exerce librement sur la surface du liquide, dans le vase M. La pression du liquide à l'intérieur de la branche du siphon qui plonge dans le vase, et au niveau de cette surface, doit donc être égale à la pression atmosphérique. Si l'on s'élève dans le siphon à partir de là, jusque dans la partie supérieure B, on trouvera des pressions de plus en plus faibles, en raison de la quantité dont on se sera élevé : la pression en B, par exemple, sera égale à la pression atmosphérique diminuée du poids d'une colonne du liquide dont il s'agit, ayant pour base l'unité de surface, et pour hauteur la distance verticale du point B au-dessus de la surface libre du liquide dans le vase M. Si ensuite on continue à marcher dans le siphon, en descendant le long de la seconde branche, on trouvera des pressions de plus en plus grandes ; arrivé en C, au niveau de la surface libre du liquide dans le vase M, on retrouvera une pression égale à la pression atmosphérique. Si l'on continue à descendre, les pressions qu'on rencontrera augmenteront encore ; et enfin, arrivé en D, on trouvera que la pression supportée par la face supérieure du petit piston qui ferme l'extrémité du tube est égale à la pression atmosphérique augmentée du poids d'une colonne de liquide ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance verticale du point D au-dessous du point C, ou, ce qui est la même chose,

au-dessous du niveau du liquide dans le vase M. Le piston placé en D supporte inférieurement la pression atmosphérique ; il est donc plus pressé de haut en bas que de bas en haut, et il se trouve dans les mêmes conditions que s'il faisait partie d'une paroi du vase M, étant placé d'ailleurs à la même distance verticale au-dessous de la surface du liquide qui y est contenu. On voit par là que, si l'on supprime le piston, qui n'avait été introduit en D que pour le raisonnement, l'écoulement se produira en raison de cette distance verticale, et la vitesse de cet écoulement devra être celle qu'acquerrait un corps, en tombant librement d'une hauteur égale à la même distance. En réalité, la vitesse d'écoulement sera plus petite, à cause du changement brusque de direction qu'éprouvent les filets liquides en pénétrant dans le siphon par l'extrémité A, et aussi à cause du frottement du liquide contre les parois intérieures du siphon, comme nous le verrons bientôt.

Pour que le siphon puisse fonctionner, il est nécessaire que l'on opère dans l'atmosphère. Sans la pression atmosphérique, qui s'exerce sur le liquide en M, ce liquide ne monterait pas de A en B. Si l'on opérait dans le vide, le liquide qu'on aurait introduit d'abord dans toute la longueur du siphon, pour l'*amorcer*, se diviserait en deux portions au point le plus élevé du tube ; une portion descendrait par la branche de gauche, et l'autre par la branche de droite. On comprendra de la même manière que, si le siphon présentait de trop grandes dimensions dans le sens vertical, il ne fonctionnerait pas, bien qu'il fût placé dans l'atmosphère, car on sait que la pression atmosphérique ne peut pas déterminer l'ascension d'un liquide à une hauteur plus grande que celle d'une colonne de ce liquide qui lui fait équilibre (§ 253).

Pour qu'un siphon puisse être facilement amorcé, on lui adapte un tube latéral, qui s'embranche sur lui tout près de l'extrémité D, et qui remonte verticalement, à côté de la branche CD. Lorsque le siphon est installé dans la position qu'il doit occuper pendant l'écoulement du liquide, sans avoir été préalablement amorcé, on ferme l'extrémité D à l'aide d'un bouchon, puis on aspire par l'extrémité supérieure du tube latéral dont on vient de parler. Cette aspiration produisant une diminution de pression de l'air qui est contenu à l'intérieur du siphon et qui ne communique pas au dehors, il en résulte que le liquide du vase M monte de A en B, et redescend ensuite de B en D. Le siphon est alors amorcé, et il suffit d'ôter le bouchon qu'on avait mis en D, pour que l'écoulement ait lieu. C'est ainsi qu'on opère souvent pour vider un tonneau plein de vin, sans avoir besoin de percer un trou

dans un des fonds : le siphon dont on se sert de fer-blanc et est construit de manière à péné par la bonde, en laissant encore tout autour de l sage pour l'air qui doit remplir le tonneau à me en sort.

§ 291. **Écoulements constants.** — Pour que laquelle un liquide s'écoule par un orifice rest la même, il faut que la charge sur cet orifice ne à-dire que la surface libre du liquide, dans le s'écoule, reste toujours à une même hauteur au-dessus de l'orifice. Nous avons vu (§ 255) un moyen qu'on peut e atteindre ce but. Un autre moyen, dont on pourra se qu'on aura à opérer sur des quantités de liquide b considérables, consiste à faire arriver une source d le réservoir, et à pratiquer dans sa paroi une échancrure correspondant au niveau constant qu'on veut que le l prenne ; si la source qui alimente le réservoir fourn liquide qu'il ne doit s'en écouler par l'orifice, l'excéd par cette échancrure, et le niveau ne variera pas. moyen est souvent employé en grand, pour régulariser la vitesse d'écoulement de l'eau qui est destinée à faire mouvoir les roues hydrauliques.

§ 292. **Écoulements intermittents.** — La *fontaine intermittente*, représentée ici (fig. 376), est un appareil disposé de manière à produire un écoulement intermittent. Un vase A contient de l'eau et se termine inférieurement par quatre orifices B, B, par lesquels cette eau peut s'écouler. Ce vase ne communique pas avec l'atmosphère par sa partie supérieure; mais il est traversé par un tube vertical CD, qui est ouvert à ses deux bouts,

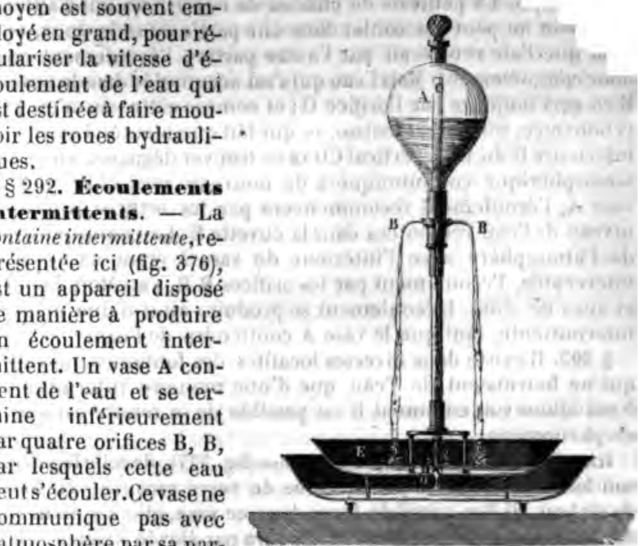


Fig. 376.

et qui fait ainsi communiquer l'air du vase A avec l'atmosphère. A la faveur de cette communication, la pression atmosphérique s'exerce librement sur l'eau contenue dans le vase A; celle-ci s'écoule par les orifices B,B, et tombe dans la cuvette E. Cette cuvette est percée d'un trou O, par lequel l'eau s'écoule dans une seconde cuvette placée au-dessous de la première. Mais l'orifice O ne laisse pas sortir autant d'eau qu'il en arrive dans la cuvette E; en sorte que le niveau du liquide s'y élève et vient bientôt fermer l'extrémité inférieure D du tube, qui permettait à la pression atmosphérique de s'exercer sur l'eau du vase A. Dès lors l'écoulement par les orifices B, B, ne s'effectue plus dans les mêmes conditions. La pression exercée par l'air qui surmonte l'eau en A diminue peu à peu, à mesure que l'eau continue à s'écouler, puisque cet air, actuellement isolé de l'atmosphère, occupe un volume de plus en plus grand. La vitesse d'écoulement par les orifices B, B, doit donc diminuer progressivement; et bientôt l'eau s'arrêtera tout à fait, lorsque l'excès de la pression atmosphérique sur la pression que supporte l'eau dans le vase A sera capable de faire équilibre à la colonne d'eau située au-dessus des orifices B, B. La petitesse de chacun de ces orifices fait d'ailleurs que l'eau ne peut pas couler dans une partie de sa largeur, pendant que l'air rentrerait par l'autre partie; l'écoulement cesse donc complétement. Mais l'eau qui s'est accumulée dans la cuvette E en sort toujours par l'orifice O; et comme cette eau n'est plus renouvelée, son niveau baisse, ce qui fait que bientôt l'extrémité inférieure D du tube vertical CD va se trouver dégagée. Alors l'air atmosphérique communiquera de nouveau avec l'intérieur du vase A, l'écoulement recommencera par les orifices B,B, et le niveau de l'eau remontera dans la cuvette E. La communication de l'atmosphère avec l'intérieur du vase A étant de nouveau interceptée, l'écoulement par les orifices B,B, s'arrêtera bientôt, et ainsi de suite. L'écoulement se produira ainsi d'une manière intermittente, tant que le vase A contiendra de l'eau.

§ 293. Il existe dans diverses localités des fontaines naturelles qui ne fournissent de l'eau que d'une manière intermittente. Nous allons voir comment il est possible de se rendre compte de ce phénomène.

Imaginons qu'on ait disposé un vase (fig. 377), de telle façon que son fond soit traversé par un tube de verre recourbé en forme de siphon. Si l'on verse de l'eau dans ce vase, elle s'y maintiendra tant que sa surface libre AB ne sera pas élevée jusqu'à la partie supérieure C du siphon. L'air atmosphérique pénétrant librement par la partie inférieure de la grande branche du siphon,

l'eau s'introduira dans la petite branche, et s'y placera au même niveau que dans le vase. Mais aussitôt que la surface libre de l'eau dans le vase s'élèvera au-dessus du point le plus élevé C du siphon, l'eau qui s'est introduite à son intérieur coulera dans la grande branche ; le siphon sera amorcé, et le vase se videra, jusqu'à ce que le niveau AB de l'eau se soit abaissé au-dessous de l'extrémité inférieure de la petite branche du siphon.

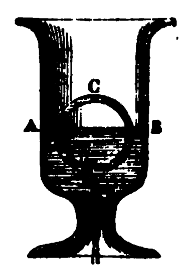
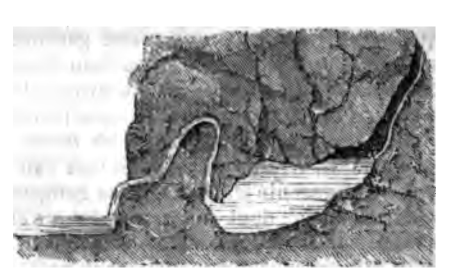


Fig. 377.

Pour obtenir un écoulement intermittent, à l'aide de l'appareil dont il vient d'être question, il suffira de faire arriver dans le vase un petit filet d'eau qui coule sans interruption. Le vase se remplira peu à peu ; la surface de l'eau AB s'y élèvera progressivement ; bientôt le siphon s'amorcera, et le vase se videra. Lorsque le niveau de l'eau se sera ainsi suffisamment abaissé, le siphon ne pourra plus fonctionner, il se videra lui-même. Alors le vase se remplira de nouveau, et l'écoulement par le siphon ne recommencera que lorsque la surface de l'eau se sera élevée de nouveau jusqu'en C. Il est clair que pour qu'on obtienne ainsi un écoulement intermittent, il faut que la quantité d'eau qui sort par le siphon soit plus grande que celle qui arrive en même temps dans le vase, et qui tend à le remplir ; sans cela le siphon ne viderait pas le vase, et resterait constamment amorcé.


Fig. 378.

Les fontaines intermittentes naturelles peuvent être produites par une disposition particulière du terrain, ayant de l'analogie avec celle de l'appareil dont nous venons de parler. Concevons qu'une cavité existe à l'intérieur de la terre (fig. 378), et qu'elle se remplisse d'eau peu à peu, soit par des infiltrations lentes, soit par un petit filet d'eau qui y est amené par une petite fissure du terrain. Concevons de plus que cette cavité communique au dehors par un conduit étroit, qui se relève d'abord, pour s'abaisser ensuite, de manière à former une sorte

de siphon. L'eau s'accumulera dans cette cavité, jusqu'à ce que son niveau se trouve à la hauteur du point le plus élevé de ce conduit. De nouvelles quantités d'eau arrivant, le siphon s'amorcera, et l'eau s'écoulera au dehors. Bientôt le siphon se videra et cessera de fonctionner, et la cavité intérieure se remplira de nouveau, jusqu'à ce que le siphon s'amorce et recommence son jeu. Pour que le siphon puisse ainsi vider ce réservoir intérieur, il est nécessaire que la surface de l'eau y soit soumise à la pression atmosphérique (§ 290), et que l'air extérieur puisse y pénétrer facilement, pendant que l'eau en sort; cette condition se trouvera très-facilement remplie, en raison des fissures nombreuses qui existent ordinairement dans les terrains, et dans lesquelles l'air atmosphérique se répand librement. La disposition qui vient d'être indiquée comme pouvant donner lieu à une fontaine intermittente n'exige pas le concours d'un grand nombre de conditions spéciales; on conçoit très-bien qu'elle se soit présentée dans plusieurs localités, par le seul effet du hasard.

§ 294. **Fontaine de Héron.** — Lorsqu'on fait sortir le liquide contenu dans un vase par une ouverture disposée de manière à produire un jet vertical, comme dans la figure 364 (page 419), il ne peut pas jaillir plus haut que le plan horizontal correspondant à la surface libre du liquide dans le vase. Mais il n'en est plus de même lorsque ce liquide est divisé en deux portions, entre lesquelles est interposée une masse gazeuze : le jet liquide peut s'élever, dans ce cas, à une hauteur beaucoup plus grande que celle qui est déterminée par la surface libre dans le réservoir. C'est ce que l'on comprendra sans peine, à l'aide de l'appareil connu sous le nom de *fontaine de Héron* (Héron, l'inventeur de cet appareil, vivait à Alexandrie vers l'an 120 avant J.-C.). Celui qui est représenté ici (fig. 379), se compose d'un simple tube de verre recourbé, dont une extrémité A s'élargit en entonnoir, et qui présente deux renflements B,C, faisant fonction de réservoirs. Si ce tube recourbé contenait seulement de l'eau, et que le liquide s'élevât dans la branche de droite, jusque dans l'entonnoir A, comme l'indique la figure, il devrait s'élever dans la branche de gauche à la même hauteur, car le tube constituerait, à proprement parler, un système de vases communiquants. Mais supposons que l'eau ne s'étende que de A en B; qu'au-dessus de la surface de l'eau dans la boule B, jusque dans la boule C, il y ait une certaine quantité d'air; puis que le reste du tube, à partir de cette boule C, soit rempli d'eau. La présence de cet air, entre les deux masses d'eau, modifiera complétement le résultat. Les surfaces de l'eau, en B et en C, font partie des parois de l'enceinte fermée

dans laquelle cet air est contenu; il exerce donc, en vertu de sa force expansive, des pressions égales aux divers points de ces deux surfaces, si toutefois on néglige son poids, qui est en effet négligeable. La pression supportée par la surface de l'eau dans la boule C est donc la même que celle qui serait produite par une colonne d'eau, pesant directement sur cette surface, et ayant une hauteur égale à la différence de niveau de l'eau en A et en B. On doit conclure de là que, si le tube qui part de la partie inférieure de la boule C et qui se relève verticalement, avait une assez grande longueur, l'eau s'y maintiendrait en équilibre à une hauteur, au-dessus du niveau en C, égale à celle de la surface de l'eau en A, au-dessus du niveau en B; et que, de plus, si ce tube n'a pas une longueur suffisante pour que l'équilibre se produise, l'eau jaillira, en s'élevant à une hauteur qui approchera de celle qui conviendrait à cet équilibre, comme le montre la figure.

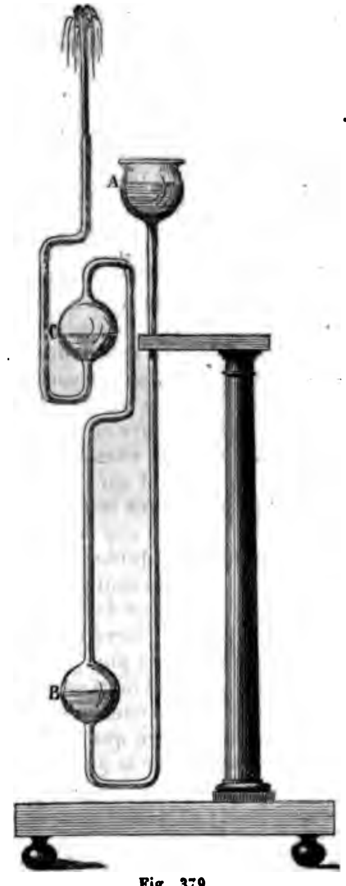


Fig. 379.

§ 295. **Mouvement des liquides dans des tuyaux.** — Lorsqu'un liquide coule dans un tuyau, en le remplissant complétement, il éprouve de la part des parois du tuyau une résistance qui diminue beaucoup sa vitesse. Pour se rendre compte de la manière dont se produit cette résistance, il faut observer que les molécules liquides qui glissent sur les parois développent ainsi un frottement qui ralentit leur mouvement; les molécules voisines des premières, se trouvant animées

d'une vitesse plus grande qu'elles, donnent lieu encore au développement d'un frottement qui tend à accélérer le mouvement des premières molécules et à ralentir celui des autres, et ainsi de suite. En sorte que, si l'écoulement du liquide est devenu régulier, on peut concevoir que ce liquide soit formé de diverses couches annulaires qui s'enveloppent les unes les autres, en s'étendant dans toute la longueur du tuyau, et qui se meuvent chacune avec une vitesse propre. La première couche, qui enveloppe toutes les autres, est celle dont la vitesse est la plus petite : la seconde couche va un peu plus vite ; la troisième, plus vite encore ; et enfin la couche la plus intérieure, qui se réduit à un simple filet liquide, est celle qui possède la plus grande vitesse. Le glissement de chacune de ces couches, à l'intérieur de celle qui l'enveloppe, détermine un frottement qui tend à diminuer la vitesse de la première et à augmenter celle de la seconde. Chaque couche est donc soumise à deux frottements, dont l'un, agissant sur sa surface extérieure, tend à ralentir son mouvement, et l'autre, agissant sur sa surface intérieure, tend au contraire à l'accélérer ; mais le premier frottement l'emporte sur le second, et la couche se trouve en définitive soumise à une résistance qui tend à diminuer sa vitesse. C'est en raison de toutes ces résistances, qui agissent sur les diverses couches, que la quantité totale qui coule dans le tuyau est diminuée.

§ 296. D'après ce que nous venons de voir, les vitesses des diverses molécules liquides qui traversent une même section transversale du tuyau ne sont pas les mêmes ; ces vitesses sont de plus en plus grandes, pour des molécules de plus en plus éloignées des parois, et c'est au centre de la section qu'est placée la molécule dont la vitesse est la plus grande. La quantité de liquide qui traverse la section dont nous parlons, dans l'espace d'une seconde, est déterminée par ces vitesses différentes. Si l'écoulement se produisait de telle manière que toutes les molécules liquides aient une même vitesse, et que le liquide se meuve comme tout d'une pièce, on obtiendrait le volume du liquide qui traverse une section transversale du tuyau en une seconde, en multipliant la surface de cette section par la vitesse du liquide ; ou bien encore, si l'on divisait le volume du liquide écoulé en une seconde, par la surface de la section transversale du tuyau, on trouverait la vitesse du liquide. Dans la réalité, les vitesses des diverses molécules liquides n'étant pas les mêmes, on ne peut pas calculer de la même manière le volume du liquide qui passe, en une seconde, par une section transversale du tuyau. Si l'on divise le volume du liquide qui s'est écoulé en une seconde par la surface de

cette section transversale, on trouvera un nombre qui ne représentera plus la vitesse des diverses molécules liquides, puisqu'elles ont des vitesses différentes ; mais ce nombre représentera une vitesse moyenne, la vitesse que devrait avoir le liquide, se mouvant tout d'une pièce, pour donner lieu à la même *dépense* (§ 284) : c'est ce que l'on nomme, dans ce cas, la vitesse du liquide, dans la section que l'on considère. Si, par exemple, la surface de la section transversale du tuyau est de 3 décimètres carrés, et qu'il s'écoule dans une seconde 24 litres de liquide, ou 24 décimètres cubes, on dira que la vitesse du liquide, dans cette section, est de 8 décimètres par seconde.

§ 297. Si le tuyau dans lequel se meut le liquide présente partout la même section transversale, la vitesse du liquide sera la même dans les diverses sections que l'on peut imaginer le long de ce tuyau. Car la quantité totale de liquide comprise entre deux de ces sections ne devant pas varier, il est nécessaire que le volume du liquide qui entre dans cet espace par l'une des sections soit égal à celui du liquide qui en sort par l'autre section ; ce qui ne peut exister qu'autant que les vitesses sont les mêmes dans ces deux sections. Les diverses molécules liquides sont donc, chacune séparément, animées d'un mouvement uniforme ; et en conséquence les forces qui sont appliquées à chacune d'elles doivent se faire équilibre. Si, au lieu de prendre une seule molécule, on prend la masse liquide comprise entre deux sections transversales du tuyau, menées à une petite distance l'une de l'autre, on voit qu'il devra encore y avoir équilibre entre toutes les forces appliquées à cette masse liquide. Or ces forces sont de trois espèces différentes : 1° Si l'axe du tuyau, dans la partie où est placée notre masse liquide, est incliné à l'horizon, elle se trouvera comme sur un plan incliné, et sera soumise en conséquence à une des composantes de son poids, qui agira dans le sens de l'axe du tuyau, et qui tendra à la faire descendre (§ 62). 2° Les pressions que la masse liquide supporte, sur les deux faces planes par lesquelles elle est en contact avec le liquide voisin, pressions qui sont dirigées en sens contraire l'une de l'autre, donneront lieu à une force unique, égale à leur différence, et agissant dans le sens de la plus grande. 3° Enfin les frottements divers dont nous avons parlé, entre les diverses couches liquides qui glissent les unes dans les autres, donneront lieu à une force unique, agissant toujours en sens contraire du mouvement du liquide. La première de ces trois forces agira dans le sens du mouvement, si le liquide descend dans la partie inclinée du tuyau où nous l'avons supposé placé ; elle agira en sens contraire du mouve-

ment, si le liquide monte ; enfin elle sera nulle, si la portion de tuyau où se trouve le liquide est horizontale. La deuxième force agira dans le sens du mouvement, ou en sens contraire, suivant que la pression exercée sur la face postérieure de la masse liquide sera plus grande ou plus petite que la pression exercée sur sa face antérieure ; elle sera nulle, si ces deux pressions sont égales. Puisque la troisième force, celle qui résulte des frottements des couches liquides les unes sur les autres et contre les parois du tuyau, est toujours dirigée en sens contraire du mouvement, il faut que l'une des deux premières au moins agisse dans le sens du mouvement, car, sans cela, les trois forces auxquelles la masse liquide est soumise ne pourraient se faire équilibre. Dans tous les cas, il faut que la somme des deux forces qui agiront dans un sens soit égale à la force qui agira dans le sens opposé.

§ 298. Quand on observe l'écoulement d'un liquide dans un tuyau, on peut trouver facilement la grandeur et le sens de chacune des deux premières forces dont nous venons de parler, relativement à la tranche de liquide qui est comprise entre deux sections déterminées du tuyau. Pour la première, on évaluera le volume du liquide contenu entre ces deux sections, on en conclura son poids; et l'on décomposera ce poids en deux composantes dirigées, l'une suivant l'axe du tuyau, l'autre suivant une perpendiculaire à cet axe (§ 62) : la première composante sera la force cherchée. Pour la seconde, on déterminera la pression supportée par chacune des deux faces de la tranche liquide (§ 222), en implantant, sur le tuyau, des tubes de verre qui s'élèvent verticalement en deux points correspondant respectivement à chacune de ces deux faces, et mesurant la hauteur à laquelle le liquide se maintiendra dans chaque tube, par suite de la pression qui existe à son extrémité inférieure dans le tuyau. La condition d'équilibre qui a été énoncée précédemment, entre les trois forces auxquelles la tranche liquide est soumise, permettra donc de trouver la grandeur de la troisième force, c'est-à-dire de la résistance occasionnée par les frottements.

Des expériences nombreuses ont fait reconnaître que pour une même vitesse du liquide, la résistance dont il s'agit est proportionnelle à l'étendue de la surface par laquelle la tranche touche les parois du tuyau. Il en résulte que, pour des tranches prises dans un même tuyau, et occupant des longueurs différentes de ce tuyau, la résistance est proportionnelle à la longueur de la portion de tuyau dans laquelle se trouve la tranche ; il en résulte encore que des tranches de même longueur et animées d'une même vitesse, étant prises dans des tuyaux différents, la résis-

tance est proportionnelle au contour de la section transversale qui sert de base à chaque tranche.

Lorsque la vitesse du liquide varie, la résistance produite par les frottements varie aussi, contrairement à ce qui arrive dans le frottement de deux corps solides l'un sur l'autre (§ 127). A égalité de surface de contact d'une tranche liquide avec les parois du tuyau, la résistance qu'éprouve cette tranche est d'autant plus grande que la vitesse du liquide est plus considérable. Quant à la loi suivant laquelle la résistance varie avec la vitesse, on peut se la représenter en admettant que cette résistance est la somme de deux forces, dont l'une est proportionnelle à la vitesse du liquide, et l'autre proportionnelle au carré de cette vitesse. En sorte que, si la vitesse devient double, triple, quadruple..., de ce qu'elle était d'abord, la résistance supportée par la tranche liquide variera dans un rapport plus grand que celui des nombres 2, 3, 4...; mais elle ne variera pas dans un rapport aussi grand que leurs carrés 4, 9, 16...

§ 299. La pression qui a lieu à l'intérieur du liquide qui coule uniformément le long d'un tuyau varie généralement d'une section transversale à une autre. La quantité dont elle varie est déterminée par la condition d'équilibre de la tranche liquide comprise entre ces deux sections transversales. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un tuyau droit AB (fig. 380), par lequel

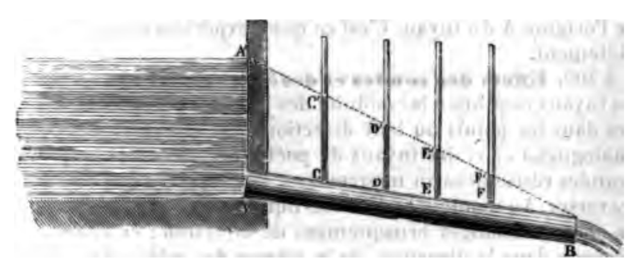


Fig. 380.

s'écoule uniformément l'eau d'un réservoir. Si nous comparons les pressions qui ont lieu aux points C, D, E, F, à l'intérieur du tuyau, nous reconnaîtrons qu'elles varient proportionnellement aux distances CD, DE, EF, comprises entre ces points. Imaginons pour cela des sections transversales faites dans le liquide par les points C, D, E, F. Les tranches liquides CD, DE, EF ont des poids proportionnels à leurs longueurs; les composantes de ces poids, dans le sens de l'axe du tuyau, sont aussi proportionnelles à leurs

longueurs, puisque le tuyau est droit, et qu'en conséquence son inclinaison est partout la même. D'un autre côté, les résistances qu'éprouvent ces diverses tranches dans leur mouvement sont également proportionnelles aux longueurs des portions du tuyau contre lesquelles elles frottent (§ 298). Donc, d'après la condition de l'équilibre entre les forces qui agissent sur chacune de ces tranches (§ 297), les différences des pressions qui agissent à leurs extrémités doivent être proportionnelles aux longueurs des tranches ; les différences des pressions en C et en D, en D et en E, en E et en F, doivent être dans le même rapport que les distances CD, DE, EF. Si les distances CD, DE, EF sont égales entre elles, la pression variera autant de C en D, que de D en E, que de E en F.

Pour mesurer les pressions qui ont lieu aux divers points C, D, E, F, on peut y implanter des tubes de verre qui s'élèvent verticalement, comme nous l'avons déjà indiqué (§ 298). L'excès de la pression, en un quelconque de ces points, sur la pression atmosphérique, sera mesuré par la hauteur à laquelle l'eau s'élèvera dans le tube de verre correspondant. Il est aisé de conclure de ce qui précède que les extrémités C', D', E', F', des colonnes d'eau que l'on obtiendra ainsi, seront situées sur une ligne droite. De plus cette ligne droite, prolongée suffisamment, devra passer par l'extrémité du tuyau, et par le point A', situé sur la surface libre de l'eau du réservoir, verticalement au-dessus de l'origine A du tuyau. C'est ce que l'expérience confirme complétement.

§ 300. **Effets des coudes et des étranglements.** — Souvent les tuyaux destinés à la conduite des liquides présentent des coudes dans les points où leur direction doit changer. Ces coudes, analogues à ceux des tuyaux de poêle, occasionnent toujours de grandes résistances au mouvement des liquides qui doivent les traverser. Au moment où les filets liquides arrivent dans un coude, ils doivent changer brusquement de direction ; ce changement brusque dans la direction de la vitesse des molécules entraîne toujours une perte de travail, ainsi que nous l'avons déjà observé à l'occasion de l'effet d'un ajutage cylindrique (§ 287). Il en résulte donc que, pour entretenir le mouvement d'un liquide, avec une vitesse donnée, dans un tuyau qui contient des coudes, il faudra employer une plus grande quantité de travail que si ces coudes n'existaient pas. Aussi, pour éviter les pertes de travail, qui sont des conséquences nécessaires de cette disposition, doit-on faire en sorte que le changement de direction des filets liquides ne s'opère que progressivement ; et pour cela, au lieu de raccorder

les deux portions du tuyau dont les directions sont différentes, en les réunissant au moyen d'un coude, il faut les relier l'une à l'autre par un tuyau courbe dont la courbure ne soit pas trop grande. En arrondissant ainsi le chemin que doit parcourir le liquide, on ramène la résistance qui s'oppose à son mouvement à être sensiblement la même que si le tuyau avait une même direction dans toute sa longueur.

Si le tuyau dans lequel circule un liquide présente intérieurement un étranglement brusque, le passage du liquide par cet étranglement occasionne encore une perte de travail, qui est également due au changement brusque qu'éprouve la vitesse des molécules liquides, changement qui porte plutôt sur la grandeur de cette vitesse que sur sa direction. La résistance occasionnée par un rétrécissement intérieur du tuyau serait beaucoup moindre, si ce rétrécissement se produisait peu à peu, de manière à modifier progressivement la vitesse des molécules liquides ; car cette vitesse doit être d'autant plus grande, que la section du tuyau, au point où se trouvent ces molécules, devient plus petite. Cependant le rétrécissement, tout en se faisant sentir peu à peu, donnera toujours lieu à une plus grande résistance que s'il n'existait pas. Car, d'une part, le liquide y prend une vitesse plus grande que dans le reste du tuyau ; d'une autre part, une même masse liquide touche les parois sur une étendue de surface d'autant plus grande que le diamètre du tuyau est plus petit : donc, pour cette double raison, les frottements qu'éprouve le liquide (§ 298) sont augmentés par la présence du rétrécissement du tuyau. On voit par là qu'il faut éviter avec soin de faire couler les liquides par des passages étroits, afin de ne pas donner lieu aux pertes de travail qui en résulteraient; et que, si l'on ne peut pas faire autrement, il faut disposer les parois entre lesquelles le liquide doit se mouvoir, de manière à ne déterminer que progressivement le changement que doit éprouver la vitesse des molécules liquides, lorsqu'elles sont obligées de traverser des étranglements.

§ 301. Nous avons dit précédemment (§ 141) que, dans certaines circonstances exceptionnelles, on a besoin d'augmenter l'action des résistances passives qui se développent dans le mouvement, afin de modérer la vitesse des corps qui se meuvent. Quand il s'agit d'un liquide qui coule dans un tuyau, on y parvient en produisant sur son passage un étranglement plus ou moins prononcé. Pour cela, on peut disposer sur le tuyau un robinet tellement construit que, lorsqu'il est tourné convenablement, son ouverture se raccorde avec l'intérieur du tuyau : en sorte que le

liquide s'écoule, en traversant ce robinet, exactement de la même manière que s'il n'existait pas. Lorsque ensuite on voudra modérer l'écoulement du liquide, il suffira de tourner un peu le robinet (fig. 381); son ouverture ne se raccordant plus avec les parties voisines du tuyau, il en résultera un étranglement brusque, qui donnera lieu à une diminution de la vitesse des molécules liquides. L'effet produit ainsi sera d'autant plus marqué que le robinet aura été tourné d'une plus grande quantité.

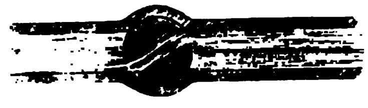


Fig. 381.

On peut employer encore un autre moyen, qui consiste à disposer une *soupape à gorge* à l'intérieur du tuyau. Ce n'est autre chose qu'un disque circulaire, fixé à un axe qui traverse le tuyau transversalement, et qui s'applique sur la surface du disque de manière à coïncider avec un de ses diamètres. En faisant tourner cet axe sur lui-même, on fait tourner en même temps le disque, qui peut prendre ainsi des positions différentes à l'intérieur du tuyau. Si l'on place ce disque de manière que son plan soit perpendiculaire à l'axe du tuyau, il s'applique sur tout son contour contre les parois, et ferme entièrement le passage du liquide. Si au contraire le plan du disque est amené à avoir la même direction que l'axe du tuyau, il ne présente que sa tranche au liquide, qui peut passer librement de chaque côté : dans ce cas, la présence du disque ne rétrécit pas beaucoup l'espace offert au passage du liquide. En donnant au disque des positions intermédiaires entre celles dont nous venons de parler, on produira un rétrécissement plus ou moins grand, qui entraînera une diminution correspondante dans la vitesse du liquide. On a des exemples de soupape à gorge dans les clefs de poêle (fig. 382), dont on se sert pour modérer en cas de besoin le mouvement ascendant de la fumée dans le tuyau.

Fig. 382.

§ 302. **Jets d'eau.** — Nous avons dit (§ 283) que, lorsqu'un liquide s'écoule par un orifice percé de manière à produire un jet vertical dirigé de bas en haut, ce jet s'élève à peu près jusqu'au niveau du liquide dans le réservoir. C'est en cela que consiste le principe des *jets d'eau*. L'eau contenue dans un réservoir descend par un tuyau qui se recourbe horizontalement, passe sous le sol, et se termine par un orifice tourné vers le haut.

Le tuyau par lequel l'eau est ainsi amenée du réservoir à l'orifice est souvent d'une grande longueur ; aussi en résulte-t-il des

frottements qui retardent l'eau dans son mouvement, et la hauteur du jet en est très-notablement diminuée. Pour que ces frottements qu'éprouve l'eau ne soient pas trop considérables, il est essentiel le donner au tuyau de conduite un assez grand diamètre ; par l on diminue la vitesse de l'eau dans le tuyau, et l'on diminue n même temps l'étendue de la portion de paroi qui est uchée par une même masse du liquide (§ 298). On détermine dinairement le diamètre du tuyau de manière que l'eau n'y t pas une vitesse de plus de 2 ou 3 décimètres par seconde.

Si l'orifice d'écoulement était muni d'un ajutage qui pût agir sur s filets liquides, en changeant brusquement leur direction, il en sulterait encore une diminution très-notable dans la hauteur du .. Un ajutage cylindrique, par exemple, diminue la vitesse écoulement d'un liquide dans le rapport de 1 à 0,82 (§ 287) ; la uteur à laquelle le liquide peut s'élever verticalement, en rtu de la vitesse à la sortie de l'ajutage, n'est donc que les 0,67 ,67 est le carré de 0,82) ou environ les $\frac{2}{3}$ de celle à laquelle il lèverait, si l'orifice était pratiqué en mince paroi. Pour ne s nuire à la hauteur du jet, on devra pratiquer l'orifice dans ne plaque de peu d'épaisseur, ou bien construire un orifice asé (§ 289). Mais la première de ces deux dispositions est pré-rable, eu égard à la beauté et à la limpidité de la colonne uide ascendante, qui seraient altérées par suite de l'adhérence s filets liquides avec les parois d'un orifice évasé.

La hauteur à laquelle l'eau jaillit est encore diminuée par la ré-stance de l'air, et aussi par la chute du liquide, qui, après avoir teint la plus grande hauteur à laquelle il pouvait s'élever, re-mbe sur le jet, et détruit ainsi une partie de la vitesse ascen-nte que possèdent encore les molécules qui le composent.

Souvent on pratique plusieurs orifices à côté les uns des autres, l'extrémité du tuyau de conduite qui amène l'eau du réservoir. es orifices, percés en divers points d'une paroi qui présente la rme d'une calotte sphérique, donnent lieu à autant de jets dont s directions sont différentes, et forment une *gerbe*. Le jet corres-ondant à l'orifice du milieu est vertical ; les autres, rangés régu-èrement autour du premier, sont plus ou moins obliques à leur rigine, suivant que la portion de paroi dans laquelle les orifices ont percés est plus ou moins inclinée à l'horizon. La vitesse avec aquelle l'eau sort des divers orifices est la même pour tous : les ets inclinés qui en résultent prennent donc la forme de paraboles qui correspondent toutes à une même vitesse de projection (§ 107). L'amplitude horizontale varie d'un jet à un autre, suivant la direc-ion de l'orifice qui donne naissance au jet ; la plus grande am-

plitude correspond au jet dont la direction initiale fait un angle de 45° avec l'horizon, et cette amplitude est double de la hauteur à laquelle s'élève verticalement le jet central.

§ 303. **Puits artésiens.** — Il existe dans la terre, à des profondeurs plus ou moins grandes au-dessous du sol, des nappes d'eau d'une très-grande étendue. L'eau y est généralement en mouvement, et cela constitue de véritables courants souterrains. Lorsqu'on perce un puits assez profond pour atteindre de pareilles nappes d'eau, le liquide s'élève dans le puits, ordinairement jusqu'à son orifice, et souvent il se produit un jet vertical à une hauteur plus ou moins grande au-dessus de la surface du sol. Les puits de ce genre portent le nom de *puits artésiens*. Ce nom leur vient de ce que c'est dans l'Artois, ancienne province de France, qu'on s'en est principalement occupé dans les temps modernes; mais il n'est pas douteux que ces puits n'aient été connus dans l'antiquité : on en a retrouvé dans les oasis d'Égypte, qui doivent remonter à des époques très-reculées.

Pour se rendre compte complétement des phénomènes que l'on observe dans les puits artésiens, il faut se rappeler que l'écorce terrestre est généralement formée, dans le voisinage de la surface, d'un grand nombre de couches superposées. Ces couches, de diverses natures, ont souvent une étendue très-grande. Leur épaisseur, sans être constante pour chacune d'elles, présente cependant une grande régularité ; et si cette épaisseur diminue ou augmente d'une partie à une autre d'une couche, ce n'est que progressivement. Les différentes couches superposées qui constituent un terrain sont donc séparées les unes des autres par des surfaces qu'on peut regarder comme sensiblement parallèles entre elles. Mais ces surfaces de séparation, qui ont dû être horizontales dans leurs divers points, lors de la formation des couches, ont généralement subi des déformations, par suite des mouvements géologiques que les couches ont éprouvés ultérieurement. Il en résulte qu'actuellement les couches sont ordinairement inclinées, et que cette inclinaison varie d'un point à un autre.

Concevons maintenant qu'un terrain soit formé de couches superposées (fig. 383), comme nous venons de le dire, et que parmi ces couches il s'en trouve une AA dans laquelle l'eau puisse se mouvoir facilement; cette couche sera formée de sables, par exemple, ou bien de matières qui présentent un grand nombre de fissures. Concevons de plus que cette couche soit comprise entre deux autres BB, CC, qui se laissent difficilement traverser par l'eau, ou mieux encore qui soient tout à fait imperméables. Si une certaine quantité d'eau s'introduit dans la couche AA,

elle circulera dans les interstices que présentent les matières dont cette couche est composée; mais elle ne pourra en sortir, ni en traversant sa face supérieure, ni en traversant sa face inférieure : elle sera maintenue à l'intérieur de la couche AA par la présence des deux couches BB, CC, qui forment comme deux barrières qu'elle ne peut pas franchir.

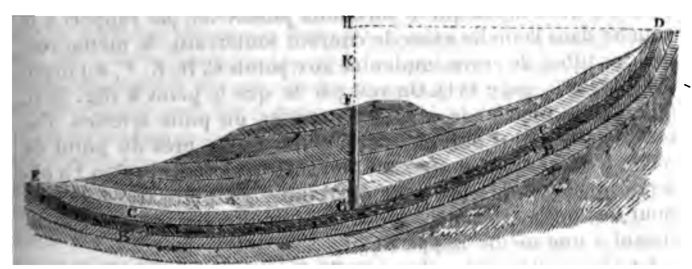


Fig. 383.

Les points où la couche AA se termine seront généralement situés sur la surface du sol : ce sont les points où elle vient percer cette surface, et que l'on nomme ses affleurements. Les eaux qui se meuvent à la surface du sol, telles que les eaux de pluie, ou bien encore les eaux des ruisseaux et des rivières, peuvent donc pénétrer dans la couche AA par ses *affleurements* ; en sorte que cette couche doit être habituellement pleine d'eau. Si les affleurements de la couche étaient tous exactement à un même niveau, l'eau qu'elle contiendrait serait à l'état d'équilibre, et formerait une nappe d'eau immobile. Mais il n'en est jamais ainsi : il existe toujours, dans les affleurements d'une couche, certains points qui sont plus élevés que d'autres. Si l'eau extérieure s'infiltre dans la couche par des points situés à un niveau supérieur à celui des affleurements les plus bas, elle ne pourra plus s'y maintenir en équilibre, et sortira nécessairement par ces affleurements; il se produira donc un courant continuel à l'intérieur de la couche : l'eau entrera d'un côté et sortira de l'autre.

Soient D (fig. 383), le point d'entrée de l'eau dans la couche, et E son point de sortie. Si l'on vient à percer en F un puits vertical FG, jusqu'à la couche AA, l'eau du courant souterrain montera dans ce puits, et pourra jaillir au-dessus de l'orifice F. Supposons d'abord qu'on ait adapté à cet orifice un tuyau vertical d'une grande hauteur, dans lequel l'eau soit obligée de rester, sans pouvoir s'écouler au dehors. Si aucune partie des affleurements de la couche AA ne se trouvait au-dessous du point d'entrée D,

l'eau monterait dans le tuyau jusqu'au point H situé au niveau du point D, en vertu du principe de l'équilibre d'un liquide dans des vases communiquants. Mais si l'eau, entrant par le point D, sort par le point E situé plus bas que le premier, elle ne peut pas s'élever dans le tuyau jusqu'en H ; sa surface libre s'arrêtera en un point K, inférieur au point D et supérieur au point E. Le puits FG et le tuyau qui le surmonte jouent ici, par rapport à la couche dans laquelle existe le courant souterrain, le même rôle que les tubes de verre implantés aux points C, D, E, F, du tuyau AB (fig. 380, page 441). On voit par là que le point K (fig. 383), qu'on peut appeler le *niveau d'équilibre* du puits artésien FG, sera d'autant plus bas que ce puits sera plus près du point de sortie E du courant souterrain ; en sorte que, ainsi qu'on l'a observé plusieurs fois, le niveau d'équilibre peut être très-différent pour des puits artésiens peu éloignés les uns des autres et aboutissant à une même nappe d'eau.

Le niveau d'équilibre du puits FG étant toujours supposé en K, si l'on n'adapte pas de tuyau à l'orifice de ce puits, l'eau jaillira au-dessus du sol, mais elle sera loin de s'élever jusqu'au point K. Pour que l'eau pût jaillir ainsi jusqu'à son niveau d'équilibre, il faudrait que rien ne s'opposât au mouvement qu'elle tend à prendre sous l'action de la pression qu'elle éprouve à la partie inférieure du puits. Mais c'est ce qui ne peut avoir lieu : en s'élevant à l'intérieur du puits, qui est habituellement étroit et profond, elle développe des frottements qui retardent son mouvement, et elle ne peut prendre qu'une vitesse très-inférieure à celle qu'elle prendrait sans ces frottements.

Si l'on adapte à l'orifice du puits un tuyau qui ne s'élève pas jusqu'au niveau d'équilibre K, l'eau montera dans ce tuyau et s'écoulera par sa partie supérieure. La vitesse de l'écoulement sera d'autant plus faible que l'extrémité supérieure du tuyau sera plus rapprochée du point K. La quantité d'eau fournie par le puits diminuera donc de plus en plus à mesure qu'on cherchera à la faire monter plus haut à l'aide d'un pareil tuyau; et elle finira par devenir nulle, si l'on veut la faire monter jusqu'au niveau d'équilibre.

On ne donne ordinairement aux puits artésiens que de petites dimensions transversales : ce sont des trous cylindriques de quelques décimètres de diamètre, et d'une profondeur quelquefois très-grande, que l'on creuse à l'aide d'outils de diverses formes, adaptés soit à l'extrémité d'une tige de fer qu'on allonge ou qu'on raccourcit à volonté, soit simplement à l'extrémité d'une *corde*. Ces puits doivent généralement être munis, dans une

grande partie de leur profondeur, sinon dans la totalité, d'un tuyau de revêtement destiné à prévenir les éboulements des parois. On peut citer comme exemple remarquable de puits artésien celui que la ville de Paris a fait creuser à l'abattoir de Grenelle, à une profondeur de 546 mètres, et dont l'eau s'élève, dans un tuyau, à une hauteur de 37 mètres au-dessus du sol.

§ 304. Pour déterminer le niveau d'équilibre d'un puits artésien, il n'est pas nécessaire d'adapter à son orifice un tuyau vertical qui s'élève jusqu'au-dessus de ce niveau ; ce moyen, qu'il serait très-difficile d'employer dans certains cas, peut être remplacé par le suivant : On fermera complétement l'orifice du puits à l'aide d'un tampon qu'on maintiendra solidement pour résister à la pression que l'eau exercera sur sa face inférieure ; puis on adaptera à une ouverture ménagée dans ce tampon un tuyau communiquant à un manomètre (§§ 257 et 258). L'air du tuyau, comprimé par l'eau du puits qui s'y introduira, pressera à son tour le mercure du manomètre ; et la pression ainsi produite pourra être évaluée en atmosphères. Si l'on retranche une unité du nombre d'atmosphères ainsi obtenu, et que l'on multiplie $10^{m},33$ (§ 245) par le reste de la soustraction, on aura en mètres la hauteur du niveau d'équilibre du puits au-dessus de son orifice. On voit en effet que la pression exercée par l'eau sur la face inférieure du tampon, pression qui est mesurée par le manomètre, est précisément celle qui soutiendrait une colonne d'eau s'élevant jusqu'au niveau d'équilibre, dans le cas où le puits, n'étant plus fermé, serait muni d'un tuyau d'une hauteur convenable. La pression dont il s'agit ferait équilibre à cette colonne d'eau et à la pression atmosphérique qui s'exercerait sur sa surface supérieure : elle sera donc de 2, de 3, de 4,... atmosphères, suivant que la hauteur du niveau d'équilibre au-dessus de l'orifice du puits sera de 1 fois, 2 fois, 3 fois,... $10^{m},33$.

Il arrive souvent que la quantité d'eau fournie par un puits artésien diminue. Cette diminution peut être attribuée à deux causes : ou bien à ce que le courant souterrain n'exerce plus une aussi grande pression à l'extrémité inférieure du puits, ou bien à ce que l'intérieur du puits s'est obstrué par des éboulements ou par l'accumulation, en certains points, des matières solides que l'eau entraîne avec elle. La détermination du niveau d'équilibre peut faire connaître immédiatement à laquelle de ces deux causes est dû l'affaiblissement du débit du puits. Dans le premier cas, on trouvera que ce niveau s'est abaissé ; dans le second, au contraire, on trouvera qu'il n'a pas varié.

Il existe certains puits artésiens dont le débit varie avec la hau-

teur de l'eau dans un cours d'eau voisin; une élévation du niveau dans ce cours d'eau est accompagnée d'une augmentation dans la quantité d'eau que fournit le puits. De même le débit de certains puits artésiens, situés dans le voisinage de la mer, varie périodiquement avec les marées; ce débit augmente ou diminue, suivant que la surface des eaux, dans la mer voisine, monte ou descend. Il est aisé de se rendre compte de ces phénomènes d'après ce que nous avons dit précédemment. Les affleurements inférieurs de la couche à laquelle aboutit le puits, ceux par lesquels sort l'eau qui se meut dans cette couche, peuvent être placés de différentes manières. Si ces affleurements existent en des points de la surface du sol qui ne sont pas habituellement recouverts d'eau, ils donnent lieu à des sources visibles; mais il n'en est plus de même s'ils sont situés sous l'eau d'une rivière ou de la mer. Dans ce dernier cas, l'orifice de sortie du courant d'eau souterrain supporte une pression due à la hauteur du niveau de l'eau dans la rivière ou dans la mer au-dessus de cet orifice. Si cette hauteur vient à varier, la pression varie dans le même sens, aux divers points du courant souterrain, de quantités plus ou moins grandes, suivant que ces points sont plus ou moins rapprochés de son orifice de sortie. Le niveau d'équilibre d'un puits artésien alimenté par ce courant s'élèvera donc et s'abaissera, en même temps que le niveau de l'eau qui presse sur les affleurements inférieurs de la couche, et par suite le débit du puits augmentera ou diminuera en même temps.

§ 305. Si le niveau d'équilibre d'un puits artésien se trouve au-dessous de la surface du sol, l'eau ne peut pas monter jusqu'à l'orifice; et par suite ce puits ne peut fournir de l'eau que comme les puits ordinaires, à la condition qu'on emploie des moyens particuliers pour l'élever jusqu'à la surface du sol. Mais si, au lieu d'y puiser de l'eau, on y en introduit, au contraire, ce qui tend à y faire monter le niveau, l'équilibre sera rompu. La colonne d'eau soutenue dans le puits deviendra trop haute pour être soutenue par la pression qui s'exerce à sa partie inférieure; et en conséquence elle descendra, de manière à rétablir le niveau où il était précédemment. On pourra donc faire arriver continuellement de l'eau dans un pareil puits, sans qu'il s'emplisse; cette eau s'écoulera dans la nappe souterraine à laquelle il communique: on aura ainsi ce que l'on nomme un *puits absorbant.*

On se sert très-souvent de puits absorbants, tels que ceux dont nous venons de parler, pour se débarrasser d'eaux nuisibles, soit pour dessécher des terrains marécageux, soit pour faire disparaître l'humidité du sol dans le voisinage de constructions

importantes auxquelles elle pourrait porter préjudice, soit enfin pour faire disparaître des eaux malsaines provenant d'un établissement industriel.

Il existe un exemple remarquable de puits absorbant à Saint-Denis, près Paris. En perçant un puits artésien sur la place de la Poste aux chevaux, on rencontra d'abord une couche absorbante; puis plus bas une nappe d'eau jaillissante, et plus bas encore une seconde nappe jaillissante, dont l'eau était de meilleure qualité que celle de la précédente. On disposa dans ce puits trois tuyaux concentriques, s'élevant tous trois jusqu'à la surface du sol, mais descendant à des profondeurs différentes. Le tuyau intérieur, plus étroit que les deux autres, fut établi jusqu'à la seconde nappe jaillissante. Le second tuyau, enveloppant le premier, de manière à laisser un espace libre entre eux, descendit jusqu'à la première nappe jaillissante. Enfin le troisième tuyau, enveloppant le second de la même manière, ne descendit que jusqu'à la couche absorbante. Par cette disposition, les eaux de la nappe jaillissante inférieure montent par le tuyau central; celles de la nappe jaillissante supérieure montent par l'espace annulaire compris entre le premier tuyau et le second; et l'excédant de ces eaux, qui n'est pas employé pour l'usage de la ville, s'écoule dans la couche absorbante, par l'espace annulaire compris entre le second et le troisième tuyau.

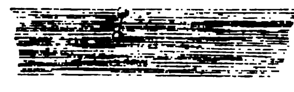
§ 306. **Mouvement de l'eau dans les canaux.** — Lorsque l'eau contenue dans un canal y est animée d'un mouvement en vertu duquel elle le parcourt dans toute sa longueur, ce mouvement est régulier tant que les circonstances dans lesquelles il se produit restent les mêmes. Le canal étant supposé avoir partout la même forme et les mêmes dimensions, tant en largeur qu'en profondeur, et l'inclinaison de son fond ne variant pas d'un point à un autre, on trouvera que le mouvement du liquide est exactement le même dans les diverses sections transversales qu'on pourra imaginer dans toute son étendue. D'après cela il est clair que chaque molécule doit se mouvoir uniformément et en ligne droite, et que la surface libre du liquide doit être plane et inclinée dans le sens du courant, de manière à être parallèle au fond du canal.

Le mouvement de l'eau dans un canal peut être assimilé au mouvement d'un liquide dans un tuyau dont les dimensions transversales sont uniformes dans toute sa longueur. La seule différence consiste en ce que, dans le canal, l'eau présente une surface libre; tandis que, dans le tuyau, le liquide est entièrement enveloppé *par des parois* solides. Les considérations dé-

veloppées précédemment (§§ 295 à 298) seront donc applicables au mouvement de l'eau dans un canal, à la condition de tenir compte de la différence qui vient d'être signalée.

D'abord les différents filets liquides ne sont pas animés d'une même vitesse (§295) ; ils se meuvent d'autant plus vite qu'ils sont plus éloignés des parois solides entre lesquelles l'eau coule. Celui de tous les filets liquides qui est animé de la plus grande vitesse doit donc se trouver sur la surface libre, au milieu de la largeur du canal; et si, à partir de ce filet liquide, on se rapproche des bords ou du fond du canal, dans une direction quelconque, on trouvera des vitesses de plus en plus petites. Ce n'est cependant pas exactement ainsi que les choses se passent ; la plus grande vitesse des molécules liquides ne s'observe pas sur la surface même de l'eau, mais un peu au-dessous. Cela tient à la présence de l'air atmosphérique qui, étant en contact avec la surface de l'eau, exerce aussi une faible résistance à son mouvement, et empêche ainsi les filets liquides qui sont à la surface de prendre la vitesse qu'ils prendraient sans cela.

Pour s'assurer de ce fait, que la vitesse de l'eau, au milieu de la largeur du canal, est moindre à la surface qu'à une petite distance au-dessous, on peut se servir de deux boules de cire liées l'une à l'autre par un fil d'une petite longueur. En mêlant à la cire de petites quantités d'autres substances, on peut faire en sorte que l'une des deux boules ait une densité moindre que celle de l'eau, et que l'autre au contraire ait une densité plus grande, de telle manière cependant que l'ensemble de ces deux boules puisse flotter sur l'eau, sans que la plus légère dépasse sensiblement la surface. Si ces boules sont mises dans une eau tranquille, elles se disposeront l'une au-dessous de l'autre, et le fil qui les réunit sera vertical. Mais si on les jette au milieu du courant qui existe dans un canal, elles sont entraînées par l'eau, et le fil qui les lie l'une à l'autre n'est plus vertical (fig. 384) ; la boule inférieure se place en avant de la boule supérieure. Il est évident que cette position, que prennent les boules dans le courant, ne peut être due qu'à ce que la vitesse de l'eau est un peu plus grande à une faible distance au-dessous de la surface qu'à la surface même.


Fig. 384.

Les molécules liquides qui traversent une même section transversale du canal étant animées de vitesses différentes, on appellera vitesse de l'eau, une vitesse moyenne entre celles de ces di-

verses molécules : ce sera la vitesse dont toutes les molécules devraient être animées à la fois, pour que la quantité d'eau qui traverse en une seconde la section que l'on considère reste la même (§ 296). D'après cette définition de la vitesse du courant, on voit que, quand on la connaîtra, il suffira de la multiplier par la surface de la section transversale du liquide, pour obtenir le volume de l'eau qui passe en une seconde par cette section transversale, c'est-à-dire ce que l'on nomme le *débit* du canal.

§ 307. L'uniformité du mouvement de chaque molécule liquide exige qu'il y ait équilibre entre les forces qui lui sont appliquées, et par conséquent aussi entre les forces auxquelles est soumise une tranche liquide comprise entre deux sections transversales très-rapprochées. Or les forces appliquées à une pareille tranche sont de trois espèces (§ 297) : 1° le fond du canal étant incliné dans le sens du mouvement, le poids de la tranche que l'on considère donne une composante parallèle à ce fond, qui tend à accélérer son mouvement ; 2° les deux faces de la tranche supportent des pressions de la part du liquide voisin ; 3° la tranche liquide éprouve une résistance occasionnée par son frottement contre les parois solides qui la renferment, et aussi contre l'air avec lequel elle est en contact. Mais les pressions que la tranche éprouve sur ses deux faces sont évidemment égales entre elles ; car la surface de l'eau étant partout soumise à la pression atmosphérique, les pressions qui ont lieu aux divers points d'une section transversale du liquide doivent être les mêmes, en quelque endroit du canal que cette section ait été prise. Les pressions supportées par notre tranche liquide sur ses deux faces se détruisant mutuellement, il ne reste que les deux autres forces, qui, en conséquence, doivent se faire équilibre. La composante du poids de la tranche liquide dans le sens du mouvement doit donc être égale à la résistance produite par son frottement contre les bords et le fond du canal et contre l'air. On voit par là que l'inclinaison du fond du canal est indispensable pour que l'écoulement régulier puisse avoir lieu. De plus, la composante du poids d'une tranche liquide, dans le sens du mouvement, étant d'autant plus grande que l'inclinaison du fond est plus forte, on voit que la vitesse du courant augmentera avec cette inclinaison : il faut en effet que la vitesse soit assez grande pour que le frottement contre les parois, frottement qui croît avec cette vitesse (§ 298), devienne capable de faire équilibre à cette composante du poids de la tranche.

§ 308. **Mouvement de l'eau dans les rivières.** — Le mouvement de l'eau dans une rivière est analogue à celui dont nous

venons de nous occuper; mais il ne présente pas la même régularité dans son ensemble, en raison de ce que le lit de la rivière n'a pas partout la même largeur ni la même profondeur, et que son fond n'a pas une pente uniforme. Cependant, si une partie de rivière d'une certaine étendue ne contient pas de trop grandes irrégularités, on peut regarder le mouvement de l'eau comme y étant le même que dans un canal, et tout ce qui a été dit dans le cas d'un canal pourra devenir applicable à cette partie de rivière. Ordinairement la quantité d'eau qui coule dans une rivière augmente depuis sa source jusqu'à son embouchure, soit à cause des affluents qui viennent s'y jeter, soit à cause des sources qui existent dans son lit. Examinons ce qui a lieu dans une étendue plus ou moins grande, dans laquelle nous admettrons que la quantité d'eau qui traverse une section transversale en une seconde reste partout la même. Si l'on suit la rivière dans toute cette étendue, on observera souvent que la vitesse du courant varie beaucoup d'un point à un autre. Ce changement de vitesse est occasionné par le changement des dimensions transversales de la rivière, soit en largeur, soit en profondeur. Nous savons en effet que, si l'on multiplie la surface d'une section, faite dans la masse liquide perpendiculairement à la direction du courant, par la vitesse moyenne qui lui correspond, on obtient le volume du liquide qui traverse cette section en une seconde (§ 306) ; et puisque ce volume est le même pour toutes les sections faites dans la portion de rivière dont nous nous occupons, il en résulte que, plus la surface d'une section transversale de la masse d'eau sera petite, plus la vitesse de l'eau y sera considérable. D'après cela, dans les endroits où la rivière sera large et profonde, l'eau sera presque stagnante; tandis que, dans les lieux où son lit sera resserré et peu profond, l'eau sera animée d'une grande vitesse.

Prenons deux tranches liquides de même volume, et comprises chacune entre deux sections transversales du courant, faites à peu de distance l'une de l'autre. Supposons que la première de ces tranches corresponde à un point de la rivière où le lit est large et profond, et qu'en conséquence sa vitesse soit faible; et que la seconde tranche au contraire corresponde à un point où le lit est étroit et peu profond, ce qui exige que sa vitesse soit plus grande que celle de la première. La condition de l'égalité des volumes de ces deux tranches fait que la distance des sections transversales qui terminent la seconde, et qui en forment comme les deux bases, doit être plus grande que la distance correspondante pour la première tranche. D'après cela, on admettra sans difficulté que la seconde tranche

frotte sur une plus grande étendue de parois solides que la première. D'ailleurs, cette seconde tranche a aussi une plus grande vitesse que la première tranche, puisque sa section transversale est plus petite. Donc, pour cette double raison, la résistance produite par le frottement contre les bords et le fond du lit est plus intense pour la seconde tranche liquide que pour la première (§ 298). Cette résistance devant être vaincue uniquement, pour chaque tranche, par la composante de son poids dirigée parallèlement à la direction du mouvement (§ 307) ; et les poids de nos deux tranches étant les mêmes, il en résulte que les molécules liquides doivent se mouvoir suivant des lignes plus inclinées dans la seconde tranche que dans la première; et qu'en conséquence l'inclinaison de la surface de l'eau doit y être également plus grande. Ainsi, partout où le lit de la rivière est large et profond et où l'eau n'est animée que d'une petite vitesse, la surface de l'eau est presque horizontale ; tandis que, dans les endroits où le courant est plus rapide, en raison du rétrécissement de la masse liquide, tant en profondeur qu'en largeur, la surface de l'eau présente une inclinaison beaucoup plus prononcée.

§ 309. Dans le moment des crues, la vitesse du courant, dans une rivière, est bien plus grande que dans les circonstances ordinaires. Pour s'en rendre compte, il suffit de voir comment varient les deux forces qui doivent constamment se faire équilibre sur chaque tranche liquide, lorsque le niveau de l'eau vient à varier. Supposons qu'habituellement la surface de l'eau soit en AB (fig. 385), mais que, par suite d'une crue, elle s'élève

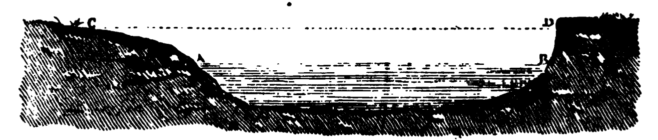


Fig. 385.

jusqu'en CD, de manière que la surface de la section transversale de la masse liquide devienne double de ce qu'elle était auparavant. La quantité de liquide contenue entre deux sections transversales voisines l'une de l'autre sera double de ce qu'elle était précédemment; mais l'étendue des parois touchées par ce liquide n'aura pas augmenté dans le même rapport. Si la vitesse du courant restait la même, il n'y aurait plus équilibre entre la force qui tend à accélérer le mouvement de cette tranche li-

quide et la résistance qui s'oppose à cette accélération, car la première a été doublée par l'élévation du niveau, tandis que la seconde ne l'a pas été. Il faut donc que la vitesse du courant s'accroisse, pour que le frottement de l'eau contre les parois devienne capable de faire encore équilibre à la composante de son poids dirigée dans le sens du mouvement.

§ 310. **Mesure de la vitesse de l'eau.** — Pour mesurer la vitesse que possède l'eau dans une rivière à une profondeur quelconque au-dessous de la surface, on peut employer avec avantage le moulinet de Woltmann (fig. 386). Ce moulinet consiste

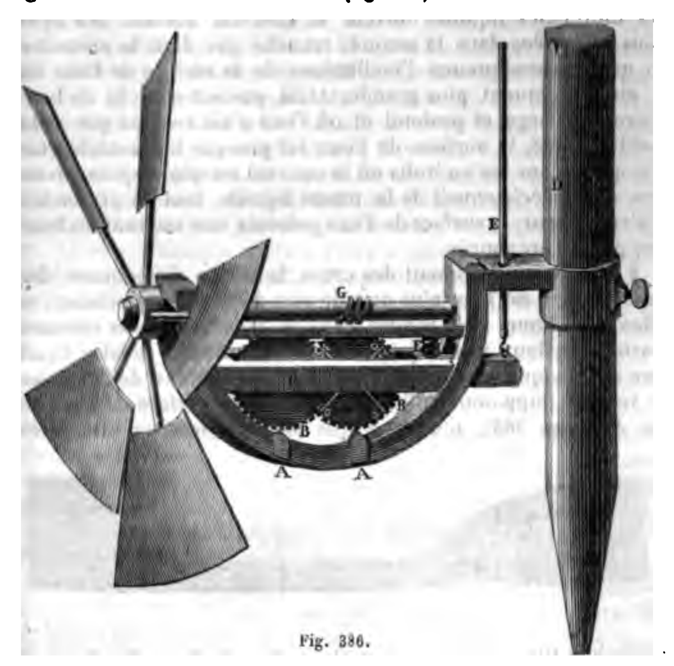


Fig. 386.

en une petite roue, formée de plusieurs ailettes planes, qui sont fixées aux extrémités d'autant de bras implantés sur un arbre horizontal. L'arbre qui porte cette roue doit être placé dans la direction même du mouvement de l'eau. Les filets liquides viennent rencontrer les ailettes de la roue qui se présentent toutes obliquement à leur direction; et l'impulsion oblique que ces ailettes reçoivent ainsi de la part de l'eau déter-

mine un mouvement de rotation de la roue, lequel est d'autant plus rapide que la vitesse de l'eau est plus grande. On conçoit, d'après cela, que le nombre des tours effectués par le moulinet, dans un temps donné, puisse faire connaître la vitesse de l'eau.

L'appareil, que la figure 386 représente de grandeur naturelle, est disposé de manière à permettre de compter facilement les tours de l'arbre qui porte la roue. A cet effet, cet arbre est muni d'un filet de vis G. Au-dessous de ce filet, se trouve une roue dentée qui peut engrener avec lui, mais qui est habituellement abaissée, de manière que la communication ne soit pas établie entre elle et l'arbre du moulinet. A côté de cette première roue, s'en trouve une seconde qui est mise en mouvement par un pignon fixé à la première, et qui marche beaucoup plus lentement qu'elle. Les axes de ces deux roues B, B, sont portés par une pièce C mobile autour de son extrémité de gauche ; une tringle E sert à soulever l'extrémité de droite de cette espèce de levier et à élever en même temps les roues B, B, de manière à faire engrener l'une d'elles avec le filet de vis G. Lorsqu'on ne tire pas la tringle E de bas en haut, le levier C s'abaisse sous l'action d'un ressort F, dont la partie supérieure s'appuie sur la monture de l'appareil : alors les roues B, B, s'abaissent en même temps, et deux petites saillies A, A, pénètrent entre leurs dents pour les empêcher de tourner. L'appareil tout entier peut glisser dans toute la hauteur d'une longue tige de fer D, et une vis sert à le fixer en un point déterminé de cette tige.

Pour installer le moulinet, on le fait monter sur la tige D, jusqu'à ce qu'il se trouve à la hauteur à laquelle il doit fonctionner au-dessus du fond de la rivière : on le fixe dans cette position ; puis on introduit la tige D dans l'eau, en la plaçant verticalement, de manière que son extrémité inférieure touche le fond et même s'y enfonce un peu, et que le moulinet soit placé en avant, du côté d'où vient le courant. Au bout de quelques instants, les ailettes ont pris un mouvement uniforme de rotation, sous l'impulsion de l'eau ; alors on tire la tringle E, et l'on met ainsi les roues B, B, en rapport avec l'arbre du moulinet. On maintient cette communication pendant un certain temps, pendant une minute, par exemple, puis on abandonne la tringle E ; les roues s'abaissent, cessent de communiquer avec l'arbre qui tourne, et s'arrêtent aussitôt par suite de la présence des saillies A, A, qui pénètrent entre leurs dents. On retire l'instrument, et, d'après la position que les saillies A, A, occupent par rapport aux roues B, B, on compte aisément le nombre total de dents dont la roue de droite a tourné pendant la durée de l'expérience; c'est en

même temps le nombre des tours effectués par le moulinet pendant ce temps : car, à chaque tour de son arbre, le filet de vis G fait tourner cette roue d'une dent.

On admettra sans difficulté que le nombre des tours que fait le moulinet dans un temps donné est proportionnel à la vitesse de l'eau : en sorte qu'il suffira de connaître le nombre de tours qu'il fait, lorsque la vitesse de l'eau a une valeur déterminée, pour qu'on puisse en conclure tout de suite la vitesse du courant qui lui aura fait faire un autre nombre de tours pendant le même temps. Si, par exemple, on sait que le moulinet fait 8 tours dans une seconde, lorsque la vitesse de l'eau est de 1^m par seconde, et que dans une expérience on ait trouvé que le moulinet faisait 20 tours dans une seconde, on en conclura que la vitesse de l'eau qui le mettait en mouvement était de $2^m,5$ par seconde.

La rapidité avec laquelle le moulinet tourne sous l'action d'un courant dont la vitesse est de 1^m par seconde dépend de ses dimensions et de la disposition de ses ailettes. Pour connaître le nombre de tours qu'il ferait dans une seconde s'il était plongé dans un pareil courant, il faut faire une expérience préalable ; cette expérience se fera, soit en plaçant l'appareil dans un courant dont on connaît la vitesse, soit en le transportant lui-même avec une vitesse donnée à l'intérieur d'une masse d'eau immobile.

§ 311. Le moulinet de Woltmann permet de déterminer la vitesse de l'eau dans une rivière, à une profondeur quelconque au-dessous de la surface. Mais si l'on veut se contenter de mesurer la vitesse à la surface même, on peut employer un moyen plus simple. Il suffira, en effet, de se servir d'un corps qu'on fera flotter sur l'eau, et dont on pourra facilement observer le mouvement. On fera en sorte que ce flotteur ne sorte presque pas de l'eau, afin qu'il ne soit pas soumis à la résistance de l'air, et il prendra sensiblement la même vitesse que l'eau, surtout si sa masse est faible. On se sert avec avantage pour cela de pains à cacheter, qui remplissent très-bien les conditions précédentes.

Si le courant présente de la régularité dans une certaine longueur, le flotteur sera animé dans toute cette longueur d'un mouvement uniforme, et il suffira de déterminer le nombre de secondes qu'il emploie à parcourir une distance connue, pour en conclure sa vitesse. A cet effet on fixera d'avance, à l'aide de jalons, ou par tout autre moyen, deux alignements dirigés perpendiculairement à l'axe de la rivière, et l'on mesurera la distance entre ces deux alignements ; puis on observera le moment où le flotteur, qu'on aura mis dans l'eau un peu plus haut, viendra passer dans la direction de chacun d'eux. Si l'on n'avait pas de

montre à secondes, pour mesurer le temps que le flotteur emploie à se rendre du premier alignement au second, on pourrait se servir d'un pendule à secondes, ainsi que nous l'avons indiqué précédemment (§ 101).

§ 312. On peut employer différents moyens pour avoir la vitesse d'un cours d'eau telle que nous l'avons définie (§ 306), c'est-à-dire la vitesse que devrait avoir toute la masse liquide, si elle se mouvait tout d'une pièce, pour que le débit du cours d'eau restât le même. Nous nous contenterons d'indiquer le plus simple, qui consiste à déduire la vitesse moyenne du cours d'eau, de la vitesse observée à sa surface à l'aide d'un flotteur. On pourra se servir pour cela du tableau suivant, qui donne la vitesse moyenne correspondant à diverses valeurs de la vitesse à la surface. Ce tableau résulte d'expériences faites par Dubuat, et, quoique ces expériences aient été faites en petit, on a reconnu que les nombres qu'il a trouvés peuvent être appliqués, sans grande erreur, à la détermination de la vitesse moyenne d'un grand cours d'eau.

VITESSE A LA SURFACE.	VITESSE MOYENNE.	VITESSE A LA SURFACE.	VITESSE MOYENNE.
m.	m.	m.	m.
0,20	0,15	2,20	1,88
0,40	0,31	2,40	2,06
0,60	0,47	2,60	2,25
0,80	0,64	2,80	2,43
1,00	0,81	3,00	2,62
1,20	0,98	3,20	2,81
1,40	1,16	3,40	3,00
1,60	1,34	3,60	3,18
1,80	1,52	3,80	3,37
2,00	1,70	4,00	3,56

La vitesse de la Seine, aux environs de Paris, est de $0^m,60$ à $0^m,65$. Les vitesses du Rhône et du Rhin sont d'environ 2^m, et s'élèvent même à 4^m dans les fortes crues.

§ 313. **Jaugeage d'un cours d'eau.** — Le moyen le plus simple qu'on puisse employer pour jauger un cours d'eau, c'est-à-dire pour mesurer la quantité d'eau qu'il fournit en une seconde, consiste à multiplier la surface de la section transver-

sale de la masse liquide par la vitesse moyenne qu'elle possède dans le voisinage de cette section (§ 306).

Nous venons de voir comment on détermine la vitesse dont on a besoin. Quant à la détermination de la surface de la section transversale du cours d'eau, elle s'effectuera sans peine, à l'aide de sondages qu'on fera pour connaître la profondeur de l'eau en plusieurs points situés dans une direction perpendiculaire au courant. Si l'on trouve que la profondeur est la même dans toute la largeur d'un cours d'eau, dont les bords sont escarpés, on en conclura que la section transversale de l'eau est un rectangle; et l'on trouvera sa surface en multipliant la largeur de la rivière par la profondeur de l'eau. Si, au contraire, comme cela arrive généralement, on reconnaît que la profondeur varie, suivant qu'on s'éloigne plus ou moins des bords, on fera des sondages régulièrement espacés dans toute la largeur de la rivière : on les fera, par exemple, de mètre en mètre. On regardera ensuite la portion de la section transversale comprise entre deux profondeurs consécutives qu'on aura mesurées, comme étant un trapèze qui aurait pour bases parallèles ces deux profondeurs, et pour hauteur la distance horizontale des points où ces deux profondeurs ont été prises. En faisant la somme des surfaces des différents trapèzes ainsi obtenus, on aura la surface entière de la section.

Si l'on trouve, par exemple, que, dans un cours d'eau d'une largeur de 8^m, la profondeur est partout de $1^m,6$, on en conclura que la surface d'une section transversale est de 12,8 mètres carrés; et si la vitesse moyenne de l'eau est de $1^m,5$, on trouvera que le débit du cours d'eau est de 19,2 mètres cubes par seconde.

Un cours d'eau peut être classé parmi les rivières, lorsque, dans son état ordinaire, il débite de 10 à 12 mètres cubes d'eau par seconde. Lorsque le débit s'élève à 30 ou 40 mètres cubes, la rivière est généralement navigable. Lorsque le débit dépasse 100 mètres cubes, le cours d'eau prend place parmi les fleuves. Ainsi, dans les circonstances ordinaires, la Seine, à Paris, débite environ 130 mètres cubes d'eau par seconde; la Garonne, à Toulouse, en débite environ 150 mètres cubes; et le Rhône, à Lyon, plus de 600 mètres cubes. D'ailleurs, la quantité d'eau que fournit un cours d'eau varie beaucoup d'une époque à une autre. Ainsi on a vu la quantité d'eau fournie par le Rhône, à Lyon, s'abaisser jusqu'à 200 mètres cubes, tandis que, le 12 février 1815, elle s'est élevée à 5 770 mètres cubes.

§ 314. Lorsqu'un barrage a été établi en travers d'un cours d'eau, et que l'eau est obligée de s'élever contre ce barrage, pour

couler par-dessus sa crête, on peut en profiter pour jauger le cours d'eau. Un pareil barrage prend le nom de *déversoir*. Il en existe quelquefois qui sont installés à demeure, et que l'on a construits par des raisons particulières, telles que le besoin d'élever le niveau de l'eau en amont. Mais on peut aussi construire des déversoirs provisoires, dans le seul but de déterminer plus exactement la quantité d'eau que fournit le cours d'eau; ce moyen n'est évidemment applicable qu'aux cours d'eau de peu d'importance.

L'observation de l'écoulement de l'eau par un déversoir a fait reconnaître que la surface de l'eau s'abaisse très-sensiblement avant d'atteindre le plan vertical qui passe par la crête du barrage (fig. 387). L'épaisseur *ab* de la lame d'eau n'est guère que les 0,72 de la hauteur *ac* du niveau de l'eau au-dessus de la crête. Il résulte des expériences nombreuses de MM. Poncelet et Lesbros que, pour trouver la quantité d'eau qui passe par un déversoir en une seconde, on peut opérer de la manière suivante. On évaluera la surface du rectangle qui aurait pour base la longueur du déversoir, et pour hauteur la différence de niveau *ac*; on multipliera cette surface par la vitesse due à la hauteur *ac* (§ 89); enfin on prendra les 0,405 du résultat ainsi obtenu.

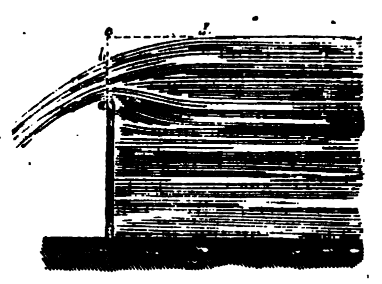


Fig. 387.

§ 315. Il arrive très-souvent que l'eau d'un cours d'eau passe par l'ouverture d'une vanne; c'est ce qui a lieu, par exemple, lorsque cette eau est employée comme moteur, pour faire mouvoir une roue hydraulique. La vanne consiste en une paroi rectangulaire, verticale ou oblique, qui est placée en travers d'un cours d'eau, pour arrêter le liquide, et qui peut se lever plus ou moins de manière à laisser au-dessous d'elle une ouverture rectangulaire par laquelle l'eau s'écoule. La veine liquide qui traverse un pareil orifice éprouve une forte contraction, dont l'intensité varie d'ailleurs avec les dimensions de l'orifice, et aussi avec la hauteur du niveau de l'eau dans le bief supérieur au-dessus de cet orifice. MM. Poncelet et Lesbros ont fait également des expériences nombreuses sur les écoulements de ce genre; il résulte de ce qu'ils ont trouvé que, dans les circonstances ordinai-

res, lorsque la levée de la vanne est d'au moins 1 décimètre, on obtiendra assez exactement la quantité d'eau qui passe en une seconde, en opérant de la manière suivante : On déterminera la surface de l'ouverture par laquelle l'eau s'écoule, en prenant cette surface dans un plan perpendiculaire à la direction moyenne des filets liquides ; on la multipliera par la vitesse due à la hauteur du niveau du liquide dans le bief au-dessus du centre de l'orifice d'écoulement ; enfin on prendra les 0,60 du résultat.

§ 316. **Écoulement d'un gaz par un orifice.** — Lorsqu'un gaz est contenu dans une enveloppe fermée, et qu'on vient à pratiquer une petite ouverture dans cette enveloppe, le gaz tend à sortir en vertu de sa force élastique. Si l'espace qui existe à l'extérieur, dans le voisinage de cette ouverture, contient lui-même un gaz ayant la même force élastique, le gaz intérieur ne pourra pas sortir ; il sera maintenu dans son enveloppe par la résistance du gaz extérieur, et les choses se passeront de la même manière que si cette enveloppe n'avait pas été percée d'un trou. C'est ce qui arrivera, par exemple, pour une masse de gaz renfermée, sous la pression atmosphérique, dans une capacité qui est elle-même placée au milieu de l'atmosphère. Mais si l'espace dans lequel le gaz intérieur peut se rendre en sortant par l'orifice qui lui est offert, se trouve vide de toute matière, ou bien, s'il contient un gaz ayant une force élastique moindre que celle du gaz intérieur, il y aura écoulement du gaz intérieur par l'orifice. Cet écoulement se produira avec une vitesse d'autant plus grande que l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure sera plus considérable.

Pour trouver la vitesse d'écoulement d'un gaz par un orifice, que nous supposerons percé en mince paroi, nous pouvons assimiler ce gaz à un liquide. Concevons pour cela qu'un liquide ait la même densité que le gaz qui s'écoule, cette densité étant prise à l'intérieur de la capacité qui renferme ce gaz, au niveau de l'orifice d'écoulement ; concevons de plus qu'un pareil liquide soit introduit dans un vase ouvert par le haut jusqu'à une hauteur telle que la pression qui en résultera, au niveau de l'orifice par lequel il doit s'écouler, soit égale à l'excès de la pression du gaz intérieur sur celle du gaz extérieur. Ce liquide ayant la même densité que notre gaz, dans le voisinage de l'orifice d'écoulement, et y étant soumis à la même pression, devra s'écouler avec la même vitesse que le gaz. Mais la vitesse que prend le liquide est celle qui est due à la hauteur de sa surface libre dans le vase au-dessus de l'orifice (§ 89) ; ce sera donc également avec cette vitesse que le gaz s'écoulera.

En appliquant ceci à un exemple, on verra bien de quelle manière la vitesse d'écoulement d'un gaz pourra être déterminée dans chaque cas. Supposons qu'une capacité fermée contienne de l'air dont la force élastique est mesurée par une colonne de mercure de 0^m,77 ; que cet air se trouve à la température de 0°, et que la pression atmosphérique, à l'extérieur de la capacité qui le contient soit de 0^m,76. Si l'on pratique une petite ouverture en mince paroi dans l'enveloppe, l'air s'écoulera par cette ouverture en raison de l'excès de la pression intérieure sur la pression extérieure, excès qui est mesuré par une colonne de mercure de 0^m,01. La densité de l'air à la température de 0°, et sous la pression de 0^m,76, est 770 fois plus petite que celle de l'eau et par conséquent 10 472 fois plus petite que celle du mercure. L'air que nous avons à considérer ici étant sous la pression de 0^m,77, sa densité est un peu plus grande : d'après la loi de Mariotte (§ 249), cette densité est seulement 10 336 fois plus petite que celle du mercure. Pour qu'un liquide de même densité, placé dans un vase ouvert par le haut, exerce au niveau de l'orifice par lequel il s'écoule une pression mesurée par 0^m,01 de mercure, il faut que sa surface libre soit située à 103^m,36 au-dessus de l'orifice. Sa vitesse d'écoulement sera donc de 45^m par seconde ; c'est en même temps la vitesse d'écoulement de l'air que nous considérons.

On voit par cet exemple qu'un excès de pression très-faible détermine une vitesse d'écoulement considérable. Cela tient à la petitesse de la masse de gaz qui est mise en mouvement par cet excès de pression (§ 95). On voit également que, pour un même excès de pression de l'intérieur à l'extérieur, la vitesse d'écoulement doit varier avec la nature du gaz, et aussi avec sa température : puisque cette vitesse dépend de la densité que possède le gaz avant de sortir de la capacité qui le renferme.

§ 317. La quantité de gaz qui passe par l'orifice dans un temps donné peut s'évaluer comme on l'a fait pour un liquide (§ 282 à 286). Si l'on admet que les molécules gazeuses traversent l'orifice en se mouvant perpendiculairement à sa surface, on trouvera le volume du gaz écoulé en une seconde en multipliant la surface de l'orifice par la vitesse d'écoulement. Le volume ainsi obtenu est celui qu'occuperait le gaz après sa sortie de l'orifice, s'il conservait la même densité qu'il avait à l'intérieur du réservoir ; et comme le gaz se dilate en sortant, en raison de la diminution de pression qu'il supporte, il en résulte qu'on devra augmenter le volume trouvé, dans le rapport dans lequel la force élastique du

gaz a diminué, afin d'obtenir le volume qu'il occupe réellement après sa sortie.

En déterminant par l'expérience la quantité de gaz qui s'écoule en une seconde par un orifice percé en mince paroi, on trouve que cette quantité est beaucoup plus petite que celle qui résulte des considérations précédentes : la *dépense effective* n'est que les 0,65 de la *dépense théorique*. La différence que l'on trouve ainsi, entre le résultat indiqué par la théorie et celui que fournit l'expérience, est ici encore due à ce que nous avons commis une erreur en admettant que les molécules gazeuses traversent l'orifice perpendiculairement à sa surface. La veine gazeuse se contracte au delà de l'orifice, de même qu'une veine liquide. C'est ce qu'on peut vérifier très-facilement en chargeant l'air de fumée, ce qui rend la veine gazeuse visible, et permet d'en observer la configuration. La contraction de la veine gazeuse est un peu moins forte que celle qu'éprouve la veine liquide dans les mêmes conditions, puisque la dépense effective est les 0,65 de la dépense théorique, dans le cas d'un gaz, et qu'elle n'en est que les 0,62, dans le cas d'un liquide.

En adaptant un ajutage à l'orifice d'écoulement d'un gaz, on modifie considérablement les conditions de l'écoulement, et ces modifications s'expliquent exactement de la même manière que dans le cas d'un liquide (§ 287). Avec un ajutage cylindrique, on obtient une dépense effective qui est les 0,93 de la dépense théorique. Quand on emploie un ajutage légèrement conique et convergent, la dépense effective devient les 0,94 de la dépense théorique évaluée à l'aide de l'orifice de sortie de l'ajutage.

§ 318. **Mouvement des gaz dans des tuyaux.** — Lorsqu'un gaz se meut à l'intérieur d'un tuyau, il éprouve de la part des parois une résistance analogue à celle dont nous avons parlé pour les liquides (§ 295). Cette résistance est proportionnelle à l'étendue de la surface contre laquelle le gaz glisse. Elle varie aussi avec la vitesse du gaz; mais, contrairement à ce qui a lieu dans le cas d'un liquide (§ 298), on peut la regarder comme étant proportionnelle au carré de la vitesse du gaz. Cette loi, qui lie la résistance des parois du tuyau à la vitesse du gaz, a été reconnue exacte pour toutes les vitesses que l'air prend habituellement dans les tuyaux de conduite, vitesses qui sont comprises entre 3^m et 50^m par seconde.

La présence des coudes et des étranglements, dans les tuyaux que parcourt un gaz, occasionne une grande résistance à son mouvement. C'est pour produire une pareille résistance, et par suite modérer la vitesse du gaz, qu'on place dans les tuyaux de

poêle une clef, ou soupape à gorge, telle que celle qui est représentée par la figure 382 (page 444).

§ 319. Le gaz qui sert à l'éclairage dans les villes est introduit d'abord à l'intérieur de grands réservoirs, auxquels on donne le nom de *gazomètres*, et de là il se rend aux différents becs où il doit brûler, en passant par des tuyaux qui sont établis sous le pavé des rues. Un gazomètre n'est autre chose qu'une cloche de tôle, (fig. 388), qui est plongée dans une grande fosse contenant de l'eau.

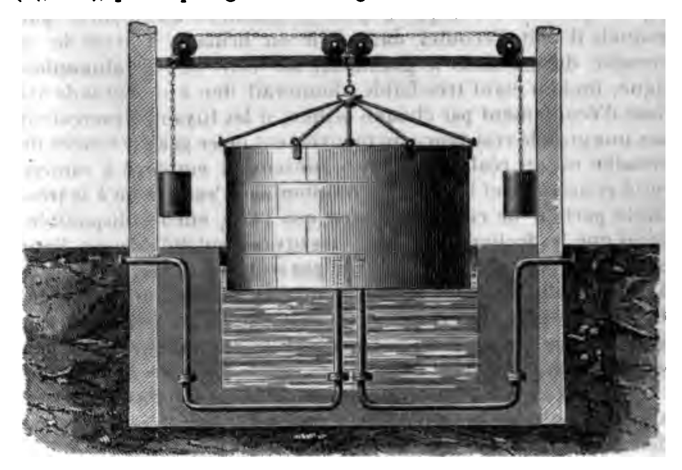


Fig. 388.

Le gaz est amené sous cette cloche, à mesure de sa fabrication, par un tuyau qui arrive au fond de la fosse, et qui se relève verticalement pour se terminer au-dessus du niveau que peut atteindre l'eau. Ce gaz ne peut s'échapper au dehors; il est maintenu latéralement et à sa partie supérieure par la paroi cylindrique et le fond de la cloche, et à sa partie inférieure par l'eau de la fosse avec laquelle il est en contact. Le poids de la cloche est en grande partie équilibré par des chaînes fixées à sa partie supérieure, qui passent sur des poulies de renvoi, et se terminent à des contrepoids. La portion restante du poids de la cloche, augmentée du poids du gaz qu'elle contient, est mise en équilibre par la poussée que la cloche éprouve de bas en haut. Cette poussée est due à la fois à l'action de l'air dans lequel la partie supérieure de la cloche est plongée, et à celle de l'eau de la fosse, dont le niveau est plus bas à l'intérieur de la cloche qu'à l'extérieur.

Les contre-poids qui équilibrent une partie du poids de la cloch sont déterminés de manière que la différence de niveau de l'ea dans la fosse, à l'intérieur et à l'extérieur de la cloche, ne soit qu de quelques centimètres. En vertu de cette différence de nivea le gaz contenu dans la cloche est un peu plus pressé que l'a atmosphérique environnant, et c'est ce qui l'oblige à sortir pa un second tuyau, placé à l'intérieur comme le premier par le quel il avait été amené. De là le gaz se répartit entre les dive tuyaux qui ont été disposés pour le conduire aux orifices pa lesquels il doit s'écouler dans l'air en brûlant. L'excès de l pression du gaz dans le gazomètre sur celle de l'air atmosph rique, tout en étant très-faible, donnerait lieu à une grande v tesse d'écoulement par chaque orifice, si les tuyaux n'exerçaie pas une grande résistance au mouvement de ce gaz ; cet excès d pression est en réalité presque entièrement employé à vainc cette résistance, et la vitesse d'écoulement n'est due qu'à la trè faible portion de cette puissance qui reste encore disponibl après que les frottements contre les tuyaux ont été vaincus. Po modérer la vitesse avec laquelle le gaz sort par un bec, on tourn d'une quantité plus ou moins grande, le robinet qui est adap au tuyau près de ce bec; on produit par là un étrangleme qui diminue la vitesse en augmentant les résistances qui s'opp sent au mouvement du gaz.

§ 320. **Mesure de la vitesse d'un courant d'air.** — No avons indiqué sommairement (§ 261) les principales causes q déterminent les mouvements de l'air atmosphérique, ou ce q l'on nomme les vents. Nous avons vu ensuite (§§ 262 et 26 comment les différences de températures produisent des coura d'air à l'intérieur des mines et dans les cheminées. Dans d'a tres circonstances, l'air est mis en mouvement par des machin spéciales, dont nous nous occuperons plus tard. De quelque m nière que se produise un courant d'air, il est souvent utile mesurer sa vitesse. On y parvient au moyen de l'*anémomè* de M. Combes. C'est un instrument analogue au moulinet Woltmann représenté par la figure 386 (page 456), qui est constr avec une très-grande légèreté, et approprié à l'usage spécial quel il est destiné. L'emploi de cet instrument est d'ailleurs tièrement pareil à celui du moulinet.

Le tableau suivant indique la vitesse que possèdent les mo cules d'air dans les diverses espèces de vents.

DÉSIGNATION DES VENTS.	VITESSE PAR SECONDE.
Vent seulement sensible	1m
Vent faible	2
Vent *frais* ou *brise* (tend bien les voiles)	6
Vent le plus convenable aux moulins	7
Bon frais, très-bon pour la marche en mer	9
Grand frais (fait serrer les hautes voiles)	12
Vent très-fort	15
Vent impétueux	20
Grande tempête	27
Ouragan	36
Ouragan qui renverse les édifices	45

§ 321. **Pression exercée par une veine liquide sur une surface.** — Lorsqu'une veine liquide vient rencontrer une surface AB (fig. 389), qui s'oppose à la continuation de son mouvement, elle étale sur cette surface, et en même temps lui fait supporter une pression. Admettons d'abord qu'il s'agisse d'une surface plane disposée perpendiculairement à la direction du liquide. Les dimensions de la surface ont une influence sur la grandeur de la pression qu'elle supporte. On conçoit en effet que cette pression, provenant de la réaction des filets liquides qui sont obligés de changer de direction, sera d'autant plus forte que le mouvement de ces filets aura été plus grandement modifié. Or, si la surface rencontrée par le liquide n'est pas plus large que la veine, les filets liquides se détourneront bien pour passer tout autour d'elle ; mais leur direction ne sera pas changée autant que si la surface était plus grande. A mesure que la surface sera plus étendue, la direction des filets liquides qui s'en échapperaient sur tout son contour s'approchera davantage d'être parallèle à la surface même, et c'est lorsque ce parallélisme sera complétement obtenu qu'on atteindra la pression maximum que la veine puisse exercer sur cette surface. L'expérience a fait reconnaître que, pour arriver à ce résultat,

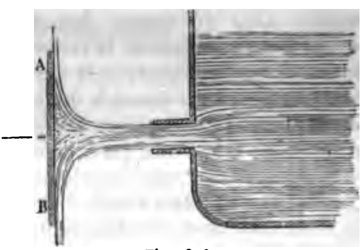


Fig. 389.

[illegible] surface ait une étendue de 6 à 8 fois plus gran[illegible] [illegible] de la veine.

[illegible] la pression exercée sur la surface, ce qui peut [illegible] cette surface s'appuierai[illegible] [illegible] représentée par le poids d'un cy[illegible] [illegible] la section de la veine, et pou[illegible] [illegible] de chute qui donnerait lieu à l[illegible] [illegible] Si l'on observe de plus que la hau[illegible] [illegible] vitesse est proportionnell[illegible] [illegible] pourra dire que la pressio[illegible] [illegible] surface plane, perpendicu[illegible] [illegible] large, est : 1° proportion[illegible] [illegible] nelle au carré de l[illegible] [illegible] qui la composent.

[illegible] résultat d'une manière trè[illegible] simple. [illegible] de vitesse de la veine liquide, il e[illegible] [illegible] supportée par la surface doit êtr[illegible] [illegible] molécules qui viennent la ren[illegible] contrer [illegible] et par conséquent propor[illegible] [illegible] En second lieu, si deux veine[illegible] de même [illegible] sont animées de vitesses différente[illegible] dont l'une sera par exemple double de l'autre, la pression exercé[illegible] par la première sera quatre fois plus grande que celle exercée pa[illegible] la seconde : car, d'une part, chaque molécule ayant une vites[illegible] double, produit [illegible] une action deux fois plu[illegible] grande ; et d'une autre part, il arrive sur la surface deux fois plu[illegible] de molécules dans le même temps.

§ 422. Si la surface contre laquelle vient tomber la veine liquid[illegible] n'est pas plane, la pression qu'elle a à supporter dépend de s[illegible] forme. Cette pression sera plus ou moins grande suivant que l[illegible] surface obligera les filets liquides à changer plus ou moins d[illegible] direction. Si la surface est convexe, les filets liquides seront moin[illegible] fortement détournés qu'ils ne le seraient par une surface plane[illegible] aussi la pression exercée sera-t-elle moins forte que celle qu[illegible] correspond à une surface plane. Si, au contraire, la surface ren[illegible] contrée par la veine liquide est concave, la pression sera plu[illegible] grande que dans le cas d'une surface plane.

Si, par exemple, la veine vient frapper au centre d'un hémi[illegible] sphère creux (fig. 390), les filets liquides s'échapperont, tout autou[illegible] des bords de cet hémisphère, avec des vitesses égales et contraire[illegible] à celles qu'ils avaient avant d'atteindre la surface. Chacun de ce[illegible] filets changera d'abord de direction jusqu'à devenir perpendicu[illegible] sa direction primitive, comme s'il avait rencontré une sur[illegible]

face plane. Mais ce changement de direction ne s'arrêtera pas là : il continuera à se produire jusqu'à ce que le filet devienne parallèle à l'axe de la veine, en se mouvant en sens contraire ; et, dans cette seconde période, il réagira sur la surface autant que dans la première. La pression totale supportée par cet hémisphère creux devra donc être double de celle qu'aurait supportée une surface plane recevant perpendiculairement l'action de la même veine. L'expérience confirme ce résultat de la théorie.

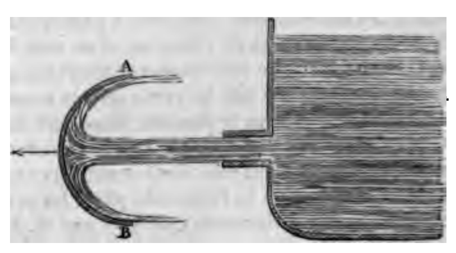


Fig. 390.

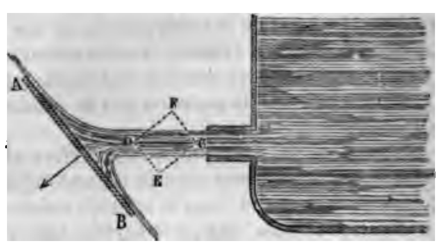


Fig. 391.

§ 323. Lorsqu'une veine liquide vient frapper une surface plane AB (fig. 391), qui se présente obliquement à sa direction, la pression qu'elle exerce sur cette surface n'est plus la même que si elle l'avait rencontrée perpendiculairement. La vitesse CD de la veine liquide peut être regardée comme résultant de la composition de deux vitesses CE, CF (§ 104), dont l'une soit perpendiculaire au plan AB, et l'autre lui soit parallèle. En vertu de la vitesse CF, la veine liquide ne fait que se mouvoir parallèlement au plan AB, ce qui ne peut donner lieu à aucune pression sur ce plan. La pression supportée par le plan est donc due uniquement à la vitesse CE ; elle est la même que si la veine se mouvait perpendiculairement à AB, avec la vitesse CE, et que sa section transversale fût égale à la section faite dans notre veine liquide par un plan parallèle à AB.

§ 324. Si la surface plane que vient rencontrer une veine liquide est elle-même en mouvement, on arrivera de la manière suivante à déterminer la pression qu'elle aura à supporter de la part de la veine. On observera que le mouvement relatif de la

veine liquide par rapport à la surface, qui seul occasionne la pression que cette surface supporte, ne sera nullement modifié si l'on donne un mouvement commun à l'ensemble de la veine liquide et de la surface; si le réservoir d'où sort la veine liquide et la surface sur laquelle elle tombe se trouvent placés sur un bateau, la pression exercée par la veine sera la même, soit que le bateau soit en repos, soit qu'il marche dans une direction ou dans une autre. On pourra donc supposer que l'on donne à la veine liquide ou au plan mobile qu'elle vient rencontrer une vitesse commune égale et contraire à la vitesse du plan. La pression du liquide sur le plan ne sera nullement changée par là. Mais le plan, se trouvant animé de deux vitesses égales et contraires, sera réduit à l'immobilité; et le liquide, animé à la fois de la vitesse qu'il avait et de celle qu'on vient de lui attribuer, possédera une vitesse unique résultant de la composition de ces deux vitesses (§ 104). On aura donc ainsi ramené la détermination de la pression exercée par une veine liquide sur une surface plane qui est en mouvement, à celle de la pression qui se produit dans le cas où cette surface est en repos.

Supposons, par exemple, que la surface plane qui reçoit l'action de la veine liquide soit animée d'une vitesse dirigée suivant l'axe même de la veine, et dans le sens du mouvement du liquide; ou, en d'autres termes, que cette surface fuie, pour ainsi dire, devant le liquide. La vitesse des molécules liquides devra être plus grande que celle du plan; sans quoi il n'y aurait pas de pression produite. En appliquant ce qui vient d'être dit en général, on trouvera que la pression supportée par le plan est la même que si ce plan était immobile, et que la veine liquide ne fût animée que de la différence entre sa vitesse propre et celle du plan.

Si le plan se mouvait toujours dans la direction de l'axe de la veine liquide, mais en sens contraire du mouvement de cette veine, la pression qu'il supporterait serait la même que s'il était immobile, et que la veine liquide possédât une vitesse égale à la somme de sa vitesse propre et de celle du plan.

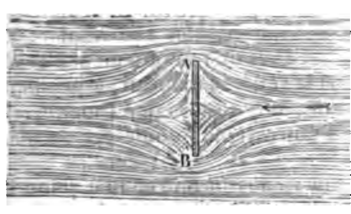


Fig. 392.

§ 325. **Pression supportée par un corps plongé dans un liquide en mouvement.** — Lorsqu'un plan AB (fig. 392) est plongé au milieu d'un liquide qui se meut perpendiculairement à sa surface, il

upporte une pression analogue à celle qu'une veine liquide exercerait contre lui. La force avec laquelle le plan doit être maintenu our ne pas céder à l'action du liquide, est due à deux causes : ° le liquide exerce sur la face antérieure du plan une pression lus grande que celle qui aurait lieu si le liquide était en repos ; ° il se produit en même temps, contre la face postérieure du lan, une diminution de pression qui est due aux remous occaionnés dans cette partie du courant par la présence du plan.

Un corps de forme quelconque, plongé dans un courant liuide, et maintenu immobile dans ce courant, éprouve de même ne pression due aux deux causes dont il vient d'être question. ais cette pression totale varie beaucoup suivant la forme que résente la partie antérieure du corps, celle qui est directement posée à l'action des filets liquides, et aussi la partie postérieure, ans le voisinage de laquelle se produisent les remous dont nous vons parlé.

L'expérience indique que, pour un même corps, la pression dont s'agit est proportionnelle au carré de la vitesse du liquide, et que, our une même vitesse du liquide et des corps de figures semblales, cette pression est proportionnelle à l'étendue de la plus grande ection transversale du corps. Si un corps n'est plongé qu'en partie ans la masse liquide, si c'est par exemple un corps flottant, on ne evra considérer évidemment que la partie de ce corps qui est siuée au-dessous de la surface du liquide.

Pour une même vitesse du liquide et une même étendue de la lus grande section transversale du corps plongé, la pression tole exercée par le liquide est d'autant plus faible que les parties ntérieure et postérieure du corps présentent des surfaces plus bliques à la direction des filets liquides : cette pression totale est oujours augmentée par les parties anguleuses de ces surfaces, entre lesquelles les filets liquides sont obligés de se mouvoir.

§ 326. Si le corps plongé au milieu d'un liquide en mouvement e déplace lui-même, on peut concevoir qu'on opère comme au 324, pour le ramener à l'état de repos. On donnera à l'ensemble u corps et du liquide qui l'environne un mouvement commun gal et contraire à celui que possède le corps. Celui-ci, se trouant animé de deux mouvements égaux et contraires, restera mmobile, et le liquide se mouvra avec la vitesse qui résultera e la composition de sa vitesse propre avec celle qu'on vient de ui donner. On retombera alors dans le cas d'un corps qui est en epos au milieu d'un liquide en mouvement.

Si, par exemple, le corps se meut dans la même direction que le liquide, *soit dans le même sens,* soit en sens contraire, la pres-

sion qu'il supportera sera la même que s'il était en repos, et que le liquide fût animé d'une vitesse égale à la différence ou à la somme de sa vitesse propre et de la vitesse du corps.

Lorsqu'un corps se meut dans un liquide en repos, il éprouve la même pression que s'il était immobile au milieu du liquide, et que celui-ci fût animé d'un mouvement égal et contraire à celui que possède le corps. C'est cette pression, éprouvée par un corps qui se déplace dans un liquide, qui constitue la résistance dont nous avons parlé précédemment (§ 130), et dont nous avons indiqué sommairement les lois.

La force qui doit être appliquée à un navire, pour entretenir son mouvement, n'a à vaincre que la résistance opposée par l'eau dans laquelle il se meut, ainsi que celle qui est occasionnée par l'air, mais qui est beaucoup plus faible. Pour diminuer la grandeur de la force motrice correspondante à une vitesse donnée, ou bien encore pour augmenter la vitesse qu'une même force motrice peut produire et entretenir, on a soin de donner aux navires une forme telle, qu'à égalité de volume immergé, la résistance au mouvement soit aussi petite que possible. Cette condition doit se combiner avec celle qui a déjà été énoncée (§ 273), et qui a pour objet la stabilité de l'équilibre. C'est pour atteindre ce but qu'on donne à la proue une forme qui lui permet de fendre facilement les flots, et qu'on arrondit les flancs du navire, tant vers la poupe que vers la proue, afin d'éviter l'augmentation de résistance qui résulterait de la présence de parties anguleuses.

Pour faire comprendre combien la forme d'un navire a d'influence sur la résistance que le liquide oppose à son mouvement, il suffit de citer le résultat d'une expérience faite par Bossut. Un modèle de vaisseau de ligne, et un prisme de même longueur qui avait pour base la plus grande section transversale du vaisseau, furent mis en mouvement dans le sens de leur longueur, dans une eau tranquille, et avec le même tirant d'eau ; Bossut trouva que l'eau opposait au prisme une résistance 5 fois plus grande qu'au vaisseau.

§ 327. **Pression exercée sur un corps par un gaz en mouvement.** — Une veine gazeuse, qui vient rencontrer une surface fixe ou mobile, exerce sur elle une pression analogue à celle qui est produite dans les mêmes circonstances par une veine liquide. Cette pression est soumise aux mêmes lois (§§ 321 à 324); et il n'y a de différence essentielle que dans son intensité, qui est généralement beaucoup plus faible que quand il s'agit d'un liquide, en raison du peu de masse de la quantité de gaz qui vient rencontrer la surface dans un temps déterminé.

Un corps qui est plongé au milieu d'une masse gazeuse en mouvement éprouve également une pression analogue à celle qu'il éprouverait si le gaz était remplacé par un liquide aussi en mouvement. Cette pression, qui devient une résistance au mouvement, dans le cas où le corps se meut à l'intérieur d'un gaz en repos, est encore soumise aux mêmes lois (§§ 325 et 326) que si elle était produite par un liquide.

§ 328. **Résistance de l'air à la chute des corps.** — Nous avons vu (§ 83) que si les corps ne tombent pas tous avec la même vitesse, cela tient à la résistance que l'air atmosphérique oppose à leur mouvement. Il nous est facile maintenant de nous rendre compte de la manière dont cette résistance agit sur les différents corps.

Lorsqu'un corps tombe dans l'air, il est soumis à l'action de deux forces, dont l'une est son poids, et l'autre est la résistance de l'air. Pour des corps de même poids et de surfaces différentes, la première force est la même, et la seconde est d'autant plus grande que la surface qui vient directement choquer l'air est plus étendue; donc ces corps tomberont d'autant moins vite qu'ils présenteront à l'air une plus grande surface. Un même corps tombera plus ou moins rapidement, suivant qu'on le tournera de telle ou telle manière : c'est ainsi que la rapidité de la chute d'une feuille de papier sera très-différente, suivant qu'on placera ses deux faces horizontalement ou verticalement.

Des corps de même nature et de formes semblables ne tomberont pas avec la même rapidité, si leurs grosseurs sont différentes. S'il s'agit de deux balles de plomb, dont l'une ait un diamètre double de celui de l'autre, on voit que le poids de la plus grosse des deux est 8 fois plus grand que le poids de la plus petite; leurs masses sont aussi dans le même rapport; il faudrait donc que la résistance de l'air fût 8 fois plus grande sur la première balle que sur la seconde pour que leur mouvement fût le même. Mais il n'en est rien. A égalité de vitesse, la résistance que l'air opposera au mouvement de la première balle ne sera que 4 fois plus grande que celle qu'éprouvera la seconde, puisque les surfaces de leurs plus grandes sections transversales sont entre elles dans le rapport de 4 à 1 : donc la plus grosse des deux balles tombera plus vite que l'autre. Ces mêmes considérations font voir pourquoi, en lançant des projectiles de même nature, mais de diverses grosseurs, au moyen d'une arme à feu, on atteint à une distance d'autant plus grande que les projectiles sont plus gros; la résistance de l'air au mouvement du projectile se fait d'autant moins sentir, que le rapport de sa masse à sa surface est plus considérable.

Lorsqu'un corps tombe dans l'air, son mouvement s'accélère, mais pas autant que s'il tombait dans le vide, en raison de la résistance qu'il éprouve de la part de l'air. A mesure que sa vitesse augmente, la résistance de l'air augmente aussi ; son mouvement s'accélère donc de moins en moins, puisque l'excès de son poids sur la résistance diminue constamment. On peut même reconnaître que la vitesse du corps ne peut pas dépasser une certaine limite ; cette vitesse limite est celle pour laquelle la résistance de l'air serait égale au poids du corps. On voit en effet que, si le corps arrivait à avoir cette vitesse, la force qui tend à accélérer son mouvement serait mise en équilibre par celle qui tend à le retarder, et qu'en conséquence le mouvement resterait uniforme. La vitesse limite dont nous parlons sera d'ailleurs d'autant plus petite que, sous une même masse, le corps présentera une plus grande surface à l'air. C'est par ces considérations qu'on peut se rendre compte de la manière dont fonctionnent les *parachutes*, à l'aide desquels on peut se laisser tomber d'une grande hauteur, sans qu'il en résulte le moindre accident. Le parachute est un appareil qui a exactement la forme d'un grand parapluie, et qui



Fig. 393. Fig. 394.

supporte à sa partie inférieure un panier dans lequel on peut se placer. Lorsque le parachute est fermé (fig. 393), il peut tomber

avec une grande vitesse; mais lorsqu'il est ouvert (fig. 394), il présente une très-grande surface à l'air, et, malgré le poids qu'il supporte, il ne peut prendre qu'une vitesse très-modérée. Si le parachute, avant de s'ouvrir, a pris une vitesse un peu grande, cette vitesse diminue aussitôt qu'il vient de s'ouvrir, en raison de la résistance de l'air qui, l'emportant sur le poids total de l'appareil, ralentit son mouvement.

§ 329. Action du gouvernail dans le mouvement d'un navire. — Le gouvernail que l'on adapte à la poupe d'un navire, a pour objet de donner au mouvement de ce navire telle direction qu'on veut. Ce n'est autre chose qu'une surface plane, disposée verticalement, et mobile autour d'un de ses côtés verticaux, qui fait fonction de charnière. Pour faire tourner le gouvernail autour de cette espèce de charnière, on agit sur un long levier qui est fixé horizontalement à sa partie supérieure, ou bien sur une roue verticale, munie de poignées sur tout son contour, laquelle est placée sur le pont du navire, et dont le mouvement de rotation se communique au gouvernail.

Admettons que le liquide sur lequel se meut le navire soit en repos, que la force qui est appliquée à ce navire tende à le faire mouvoir dans le sens de sa longueur, et que son mouvement doive s'effectuer dans ce sens pendant un certain temps, sans changer de direction. On devra placer le gouvernail de manière que ses deux faces soient dans la direction même de l'axe du navire, et par conséquent du mouvement dont il est animé. Mais, si l'on veut qu'à un moment donné le navire prenne une autre route, que sa proue se dirige, par exemple, à droite du point vers lequel elle était dirigée jusque-là, on fera tourner le gouvernail de ce même côté (fig. 395). Le mouvement du navire se

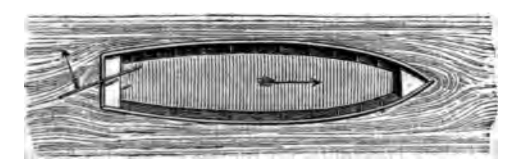


Fig. 395.

continuant comme il avait lieu dans l'instant d'auparavant, le gouvernail éprouvera de la part du liquide une pression perpendiculaire à sa surface, pression qu'il n'éprouvait pas avant qu'on lui eût donné sa nouvelle position. Cette pression agit sur le navire avec lequel le gouvernail fait corps, et l'oblige à tourner

dans le sens voulu. Lorsque l'axe du navire a été ainsi amené dans la nouvelle direction qu'il doit prendre, on replace le gouvernail comme il était précédemment, et le mouvement s'effectue en ligne droite, jusqu'à ce qu'on agisse de nouveau sur le gouvernail.

Le mouvement d'un navire a souvent lieu dans des conditions moins simples que celles que nous venons de supposer. La force qui le fait mouvoir n'agit pas toujours dans le sens du mouvement qu'on veut lui donner; c'est ce qui a lieu la plupart du temps, par exemple, lorsque le navire est poussé par le vent. De même le liquide dans lequel s'effectue le mouvement est souvent animé lui-même d'une certaine vitesse, dont la direction est différente de celle que doit prendre le navire; il en résulte que la résistance que le liquide oppose au mouvement du navire n'agit pas suivant son axe. Si le navire, dans de telles conditions, n'avait pas de gouvernail, il se déplacerait en ne suivant généralement pas le chemin qu'on veut lui faire suivre. A l'aide du gouvernail, en le faisant tourner, soit d'un côté, soit de l'autre, on développe une nouvelle force provenant de la pression qu'il supporte de la part du liquide; et l'on fait en sorte que cette nouvelle force, en se combinant avec celles dont nous venons de parler, donne au navire le mouvement qu'on veut lui faire prendre.

Le gouvernail d'un navire n'est qu'une imitation de la queue des poissons, qui leur sert à se diriger à volonté d'un côté ou d'un autre; il leur suffit pour cela de la dévier de sa position naturelle, en la portant un peu à droite ou à gauche.

§ 330. **Propulsion des navires à l'aide de rames, de roues, ou d'hélices.** — Les rames, dont on se sert pour produire et entretenir le mouvement d'un bateau, sont des leviers droits ayant leur point d'appui sur les bords du bateau. L'une des extrémités de chaque rame plonge dans l'eau, tandis qu'un homme assis dans le bateau, le dos tourné à la proue, tire l'autre extrémité vers lui. En agissant ainsi sur la rame, il la fait tourner autour de son point d'appui, et par suite l'extrémité qui plonge dans l'eau s'y met en mouvement, en allant de la proue à la poupe. Ce mouvement de la rame développe une résistance de la part du liquide : cette résistance est une force qui lui est appliquée, et qui est dirigée en sens contraire de son mouvement, c'est-à-dire de la poupe à la proue. La rame se trouve ainsi soumise à l'action de deux forces parallèles et de même sens, dont l'une est due à l'action de l'homme qui la manœuvre, et l'autre à la résistance que le liquide oppose à son mouvement. Ces deux forces, agissant aux deux extrémités de la rame, donnent une résultante égale à leur somme, appliquée au point où cette rame s'appuie contre le

bateau ; c'est donc cette résultante qui semble être la force qui agit sur le bateau, pour entretenir son mouvement. Mais, pour peu qu'on y réfléchisse, on reconnaîtra que l'homme ne peut exercer avec ses mains une force de traction sur l'extrémité de la rame, qu'autant qu'il appuie en même temps ses pieds contre le bateau, de manière à lui appliquer une pression égale et contraire à cette force de traction ; la force développée par la contraction de ses muscles fait que son corps fonctionne comme un ressort qui aurait été comprimé, et qui, en cherchant à se détendre, exercerait des pressions égales et contraires sur les corps avec lesquels il serait en contact par ses extrémités. L'action de l'homme sur la rame détermine bien, au point où elle s'appuie contre le bateau, une pression égale à la résultante dont nous avons parlé il n'y a qu'un instant ; mais elle donne lieu en même temps à une pression en sens contraire, exercée par ses pieds. En définitive, le bateau n'est soumis qu'à la différence de ces deux forces, différence qui est précisément égale à la pression que la rame éprouve de la part du liquide dans lequel elle se meut : c'est cette force seule qui tend à accélérer le mouvement du bateau.

Ce résultat auquel nous venons d'arriver s'obtient d'ailleurs immédiatement, si l'on ne s'inquiète pas de savoir comment la rame est liée au bateau, ni par quel moyen elle est mise en mouvement. La résistance que l'eau lui oppose est évidemment la seule force extérieure qui agisse sur le bateau, et qui puisse être regardée comme étant la force motrice tendant à augmenter sa vitesse.

Lorsqu'une rame a tourné d'une certaine quantité autour de son point d'appui, elle ne se trouve plus dans une position convenable pour continuer son action. Alors l'homme qui la manœuvre abaisse l'extrémité qu'il tient dans ses mains, pour élever en même temps l'autre extrémité et la faire sortir de l'eau ; puis il fait tourner la rame autour de son point d'appui, en sens contraire de celui dans lequel elle avait tourné précédemment, et il l'introduit de nouveau dans l'eau pour recommencer son action. C'est en donnant à la rame une série de mouvements alternatifs, tels que celui que nous venons de décrire, qu'elle peut agir pendant un temps quelconque pour entretenir le mouvement du bateau. Dans ces mouvements successifs, l'extrémité de la rame qui est hors du bateau marche tantôt de la proue vers la poupe, tantôt de la poupe vers la proue. Dans le premier cas, elle est plongée dans l'eau ; dans le second, elle est hors de l'eau, et se meut dans l'air.

La pression que la rame éprouve de la part de l'eau est d'au-

tant plus grande qu'elle rencontre le liquide sous une plus grand surface et avec une plus grande vitesse. C'est afin de ne pas avoi à lui donner une vitesse trop considérable, pour produire un action convenable sur le bateau, qu'on élargit la partie qui doi plonger dans l'eau, en ne lui conservant que l'épaisseur nécessaire à sa solidité. On obtient, par cet accroissement de surface, le même effet qui aurait pu être produit par une augmentation de la vitesse, et la manœuvre de la rame en est rendue plus facile.

Pour qu'un bateau marche convenablement, à l'aide de rames, il faut qu'il y en ait un nombre pair qui agissent, moitié d'un côté, moitié de l'autre. Sans cela, les impulsions que le liquide transmet au bateau, par l'intermédiaire des diverses rames, donneraient lieu à une résultante qui serait trop éloignée d'être dirigée suivant son axe, et il tendrait constamment à se détourner de sa route, par suite de l'action oblique de cette résultante.

§ 331. Pour faire marcher un bateau de grande dimension au moyen de rames, il faudrait en employer un grand nombre, ce qui entraînerait des inconvénients de plus d'un genre, surtout pour des voyages un peu longs. Dans ce cas, on remplacera les rames par des roues à palettes (fig. 396), auxquelles on donnera un mouvement de rotation au moyen d'une machine à vapeur : c'est

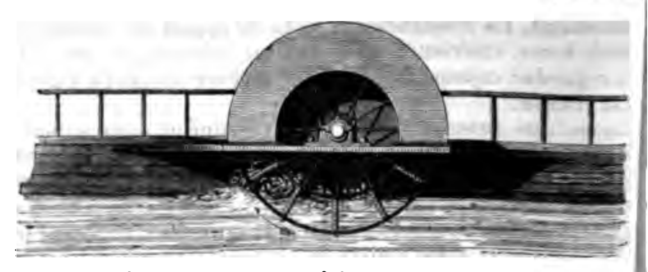


Fig. 396.

ce qui constitue les *bateaux à vapeur*. Les roues sont au nombre de deux, une de chaque côté du bateau ; elles sont montées aux deux extrémités d'un arbre horizontal, qui traverse le bateau perpendiculairement à sa longueur, et qui reçoit un mouvement de rotation de la machine à vapeur. Les palettes de ces roues fonctionnent absolument comme des rames. Lorsqu'elles sont à la partie inférieure de la circonférence qu'elles décrivent, elles plongent dans l'eau, et marchent de la proue vers la poupe ; elles sortent ensuite de l'eau, et se meuvent dans l'air en sens contraire, pour revenir plonger dans l'eau, et s'y mouvoir de

même manière que précédemment. C'est la pression que l'eau exerce sur les palettes immergées qui constitue la force motrice appliquée au bateau, et tend à accroître sa vitesse.

§ 332. Depuis quelques années, on s'est beaucoup occupé de remplacer les roues des bateaux à vapeur par des *hélices*. Pour nous rendre compte du mode d'action de ces hélices, auxquelles on a donné des formes très-diverses, imaginons qu'un bateau soit muni d'une vis, dont l'axe, placé horizontalement, soit dirigé dans le sens de la longueur du bateau; concevons de plus que cette vis, pouvant tourner autour de son axe, dans des collets fixés au bateau, soit engagée dans un écrou solidement maintenu dans une position invariable par rapport au sol environnant. Si l'on fait tourner la vis, elle marchera dans l'écrou, et entraînera le bateau avec elle. L'hélice qu'on adapte à un bateau est une véritable vis, qui fonctionne d'une manière analogue à celle dont nous venons de parler; et il n'y a de différence qu'en ce que l'écrou fixe est remplacé par l'eau dans laquelle l'hélice tourne. Cette eau, qui fait fonction d'écrou, ne reste pas immobile comme l'écrou qu'elle remplace; mais la résistance qu'elle exerce sur les surfaces inclinées de l'hélice ne communique pas moins au bateau un mouvement de progression, qui est d'autant plus rapide que l'hélice tourne plus vite.

L'hélice A (fig. 397) se place à l'arrière du bateau, vers sa par-

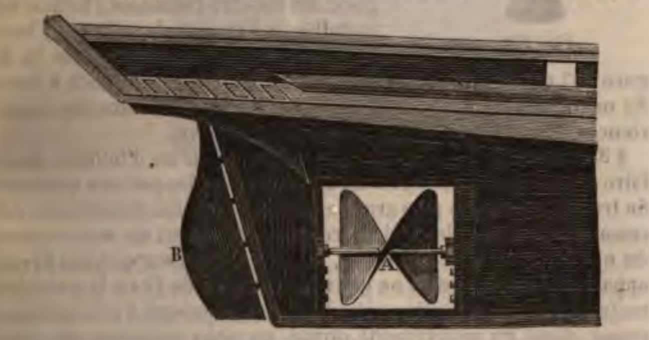


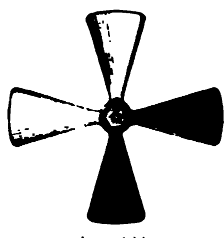
Fig. 397.

tie inférieure, et dans le plan vertical qui passe par son axe; elle se trouve ainsi à une petite distance en avant du gouvernail B.

Si l'on fait attention à la manière dont l'hélice est installée, on reconnaîtra qu'elle doit présenter un avantage sur les roues, pour la navigation sur mer : *c'est que son action est toujours très-ré-*

gulière, tandis qu'il n'en est pas de même des roues. Le bateau s'inclinant, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, les deux roues se trouvent inégalement plongées, et par suite les pressions qu'elles éprouvent de la part de l'eau sont quelquefois très-différentes de l'une à l'autre; il en résulte que le bateau tend à se détourner de sa route. L'hélice, au contraire, agit toujours de la même manière, quelle que soit l'inclinaison que prenne le bateau dans un sens ou dans l'autre; elle lui transmet constamment une pression dirigée dans le sens de son axe.

L'expérience a fait reconnaître en effet que l'emploi de l'hélice, comme moyen de propulsion des navires sur mer, est préférable à l'emploi des roues, toutes les fois que la navigation ne s'effectue pas dans les conditions de régularité qui existent dans les temps calmes; et que, même lorsqu'on se trouve dans ces conditions de régularité, l'hélice produit d'aussi bons effets que les roues.


Fig. 398.

On a beaucoup varié la forme des hélices, et l'on n'est pas encore arrêté sur celle qui offre le plus d'avantages. La figure 398 représente l'hélice du vaisseau français *le Napoléon*. On voit que cette hélice est formée de quatre ailes obliques, disposées comme les ailes d'un moulin à vent. La figure 399 montre comment l'hélice est installée à l'arrière du vaisseau, tout près du gouvernail. L'hélice de la figure 397 est celle qui a été installée par l'Anglais Smith à bord du navire *l'Archimède*, et qui a servi la première, dans des expériences en grand, faites sur mer avec ce navire.

§ 333. Quand on se sert de rames, de roues, ou d'hélices, pour faire mouvoir un navire, on est obligé de développer une quantité de travail beaucoup plus grande que celle qui est strictement nécessaire, en raison des résistances qui s'opposent au mouvement du navire. Pour le reconnaître, il suffit d'observer que ces divers appareils de propulsion ne peuvent recevoir de l'eau la pression motrice dont on a besoin, qu'autant qu'ils donnent à une certaine masse d'eau un mouvement dirigé en sens contraire de celui qu'ils doivent transmettre au navire. Toute la portion du travail moteur qui est employée à produire ce mouvement de l'eau est en pure perte; et c'est ce qui fait qu'il existe une différence très-grande entre le travail moteur total développé par le moteur qui met l'appareil de propulsion en mouvement, et le travail résistant occasionné par les résistances que le navire a à vaincre.

La perte de travail dont il est ici question est due à ce que, ur pousser le navire en avant, on prend son point d'appui sur corps qui n'est pas fixe, sur l'eau même dans laquelle le na-

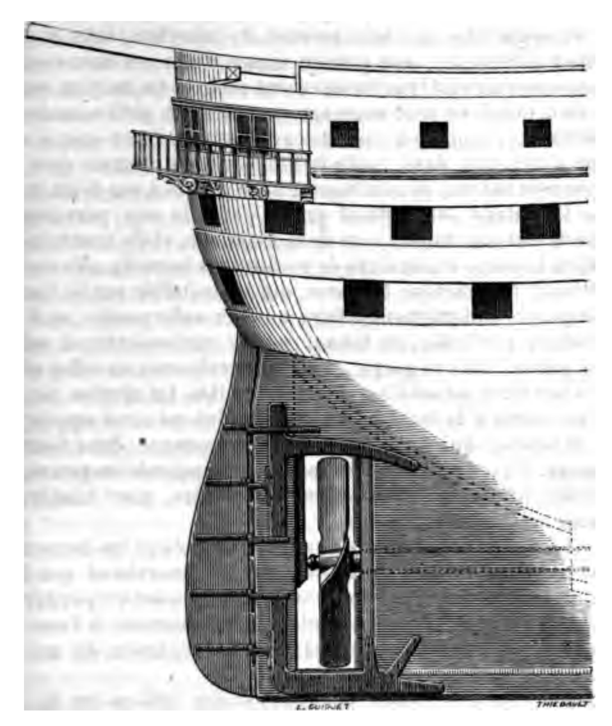


Fig. 399.

re est plongé. Si l'on pouvait s'appuyer sur des corps fixés au nd de l'eau ou au rivage, ces corps ne céderaient pas à la pres- n qu'ils auraient à supporter ; ils ne prendraient pas de mouve- ent, comme l'eau, et n'absorberaient pas ainsi une portion très- table du travail développé par le moteur. Les choses se passe- ient alors comme dans la traction d'un convoi de wagons par une comotive (§ 191). Les roues motrices de la locomotive fonction- nt exactement de la même manière que les roues d'un bateau à peur; mais, au lieu de s'appuyer comme elles sur un corps qui de à leur action, elles s'appuient sur les rails qui sont fixés au sol,

et qui ne peuvent, en conséquence, prendre un mouvement en sens contraire de celui que la locomotive doit donner au convoi.

Pour faire disparaître la grande perte de travail qui vient d'être signalée, on a imaginé un moyen de donner aux bateaux à vapeur un appui fixe, qui leur permet de marcher, sans mettre, comme à l'ordinaire, une grande masse d'eau en mouvement, en sens contraire de leur mouvement propre. Ce moyen qui ne peut être employé avec avantage que dans un petit nombre de circonstances, consiste à installer au fond de l'eau une longue chaîne s'étendant dans toute la longueur du chemin que doit parcourir le bateau, et solidement fixée au sol à ses deux extrémités. Le bateau étant placé en un point de son parcours, la chaîne le traverse dans le sens de sa longueur, et s'y trouve engagée dans la gorge d'une sorte de poulie dans laquelle elle ne peut pas glisser. La machine à vapeur, qui est installée sur le bateau, est employée uniquement à faire tourner cette poulie, qui tend à entraîner la chaîne, en faisant passer successivement ses diverses parties dans sa gorge, et qui l'entraînerait en effet si elle n'était pas fixée au sol à ses deux extrémités. La chaîne ne pouvant pas céder à la force de traction qui lui est ainsi appliquée, c'est le bateau qui se déplace en la parcourant dans toute sa longueur. Il existe à Paris des bateaux à vapeur de ce genre, qui fonctionnent comme nous venons de le dire, pour remorquer d'autres bateaux sur la Seine.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que, lorsqu'un bateau est traîné par des hommes ou des chevaux qui marchent sur le rivage, on ne rencontre pas non plus l'inconvénient de perdre une portion du travail moteur développé, en donnant à l'eau une certaine quantité de mouvement en sens contraire du mouvement du bateau.

§ 334. L'effet des rames, des roues et des hélices est de faire mouvoir le navire sur lequel elles agissent, relativement à la masse d'eau qui les environne. Mais, si cette masse d'eau est elle-même en mouvement, le mouvement que le navire prend ainsi par rapport à elle peut être très-différent de son mouvement absolu dans l'espace. Pour trouver ce mouvement absolu, il faut regarder le navire comme étant animé à la fois de deux mouvements, dont l'un est le mouvement de l'eau sur laquelle il flotte, et l'autre est son mouvement par rapport à cette eau ; en composant à chaque instant les vitesses qu'il possède en vertu de ces deux mouvements (§ 104), on trouvera sa vitesse absolue dans l'espace.

C'est ainsi que lorsqu'on veut traverser une rivière en bateau, suivant une direction perpendiculaire à celle du courant, on est

obligé de diriger le bateau et de manœuvrer les rames comme si l'on voulait traverser la rivière obliquement, en remontant le courant. Si l'on agissait comme si l'eau était en repos, on irait rejoindre l'autre bord en un point qui, au lieu de se trouver en face du point de départ, serait situé beaucoup plus bas.

Si le mouvement du navire a la même direction que celui de l'eau dans laquelle il se meut, sa vitesse absolue sera égale à la somme ou à la différence de la vitesse de l'eau et de sa vitesse par rapport à l'eau, suivant qu'il marchera dans le sens du courant ou en sens contraire. Supposons, par exemple, qu'un bateau à vapeur marchant dans une eau tranquille, y prenne une vitesse de 5m par seconde, et qu'on le fasse marcher sur une rivière dont le courant a une vitesse de 2m par seconde : sa vitesse absolue sera de 7m ou de 3m par seconde, suivant qu'il descendra ou qu'il remontera le courant.

Il est clair, d'après cela, qu'un bateau à vapeur ne pourra remonter un courant qu'autant que la vitesse qu'il prendrait dans une eau tranquille sera plus grande que la vitesse du courant. Dans le cas contraire, si le bateau cherchait à remonter le courant, il serait entraîné par l'eau, et marcherait en sens contraire du sens dans lequel il tend à marcher, avec une vitesse égale à l'excès de la vitesse du courant sur celle qu'il prend par rapport à l'eau.

§ 335. **Cerf-volant.** — Tout le monde connaît les cerfs-volants qui servent de jouets aux enfants, et que l'on élève en l'air au moyen du vent. Il est aisé de se rendre compte de la manière dont ils peuvent être soutenus dans l'atmosphère par l'action de l'air. Un cerf-volant est une sorte de grande raquette dont le cadre est formé au moyen de baguettes légères, et dont la surface est recouverte de papier collé sur ce cadre ; une baguette droite le traverse dans toute sa longueur, et en forme, pour ainsi dire, l'axe. Si l'on présente cette surface de papier au vent, de manière que les molécules d'air viennent la rencontrer perpendiculairement, elle éprouvera une pression dont l'intensité dépendra de la grandeur de la surface et de la vitesse du vent (§ 327). On conçoit qu'il existe un certain point tel, que si le cerf-volant était soutenu en ce seul point, pour résister au vent, il se maintiendrait en équilibre sans que sa surface s'inclinât ni d'un côté ni de l'autre : ce point est ce qu'on peut appeler le centre de pression. Si une ficelle était attachée en ce point même, et qu'elle fût retenue assez fortement à son autre extrémité, de manière à s'opposer à l'action du vent, la pression exercée par l'air sur la surface serait vaincue par la tension de cette ficelle. Mais si la ficelle est attachée à l'axe du cerf-

volant au-dessus du centre de pression, il n'en sera plus de même: la tension de la ficelle ne pourra plus détruire la pression du vent. Cette pression poussera en arrière la partie inférieure du cerf-volant, qui prendra ainsi une position inclinée, et qui tendra à se placer horizontalement. Mais, d'un autre côté, le poids du cerf-volant, et surtout le poids de la queue, que l'on attache à sa partie inférieure, s'opposent à ce que sa surface s'approche de la position horizontale. La pression exercée par l'air, étant toujours perpendiculaire à la surface du cerf-volant, sera donc également oblique, et dirigée de bas en haut : c'est cette pression qui fait monter l'appareil, tant qu'elle l'emporte sur la résultante de son poids et de la tension de la ficelle.

§ 336. **Navigation aérienne.** — Dès qu'on eut trouvé le moyen de s'élever dans l'atmosphère à l'aide des ballons, on eut l'idée d'en profiter pour effectuer des voyages. Mais pour réaliser cette idée, il fallait pouvoir faire marcher à volonté un ballon dans telle ou telle direction. Bien des tentatives ont été faites jusqu'à présent pour arriver à la solution de cette question, et les résultats ont toujours été à peu près nuls; on se demande même s'il est possible de réussir dans de pareilles tentatives. En analysant cette fameuse question de la direction des ballons, il ne nous sera pas difficile de nous rendre un compte exact de sa nature, et de voir, jusqu'à un certain point, combien on peut compter en trouver une solution complète.

Imaginons qu'un ballon soit en équilibre dans une couche de l'atmosphère, et que l'air de cette couche soit absolument en repos. Sera-t-il possible, en manœuvrant un appareil convenable adapté au ballon, de déterminer un mouvement de transport de toute la machine dans telle direction qu'on voudra ? Il n'est pas difficile de répondre à cette question. D'abord il est bien clair que dès le moment qu'on pourra produire un mouvement dans une certaine direction, on pourra tout aussi bien le produire dans une autre, puisque l'air dans lequel se trouve le ballon est supposé immobile ; d'ailleurs il suffira d'employer un gouvernail, analogue à celui qui fonctionne dans les navires (§ 329), pour changer à volonté la direction du mouvement, une fois qu'il aura été produit. Reste à voir s'il est possible en effet de déterminer un mouvement de translation du ballon dans cet air immobile. C'est ce dont on ne doit pas douter, en observant qu'il suffirait pour cela de lui adapter des appareils analogues aux ailes des oiseaux, et susceptibles de se mouvoir de la même manière. Les appareils de ce genre, animés d'un mouvement de *va-et-vient*, et présentant une grande surface à l'air, lorsqu'ils se mou-

vraient dans un sens, tandis qu'ils ne lui présenteraient que leur tranche lorsqu'ils reviendraient en sens contraire, communiqueraient certainement au ballon un mouvement de transport. Au lieu de ces espèces de rames à large surface, on pourrait encore se servir d'hélices semblables à celles que l'on adapte aux navires (§ 332). Mais, si l'on réfléchit à la grandeur que doit nécessairement avoir un ballon pour pouvoir porter quelques personnes, et par conséquent à la grande surface avec laquelle il doit rencontrer l'air dans son mouvement, on se convaincra qu'un appareil de propulsion, quel qu'il soit, étant mû par des voyageurs, ne pourra donner au navire aérien qu'une faible vitesse. On peut avoir, il est vrai, l'idée de faire porter par le ballon une machine motrice, telle qu'une machine à vapeur, par exemple. Mais si l'on augmentait par là la force dont on pourrait disposer pour faire mouvoir l'appareil de propulsion, on augmenterait aussi considérablement le chargement du ballon : son volume devrait s'accroître en conséquence, et il en résulterait une augmentation de la résistance à vaincre pour entretenir une même vitesse.

Il est très-probable que, quelle que soit la disposition adoptée, la vitesse de transport qu'on pourra donner à un ballon, au milieu d'un air tranquille, sera toujours petite. Ajoutons à cela que, si l'on pouvait espérer d'arriver à produire un mouvement plus rapide, en employant une autre force que celle des voyageurs, et par conséquent en donnant à la machine entière des dimensions beaucoup plus grandes que celles qui ont été données aux ballons jusqu'à présent, l'appareil de propulsion devrait être lui-même très-développé, aussi léger que possible, et par suite extrêmement difficile à manœuvrer d'une manière convenable; cet appareil éprouverait nécessairement de fréquentes avaries, qui le mettraient souvent hors d'état de fonctionner.

Examinons maintenant ce qui se passerait, si l'on cherchait à faire mouvoir un ballon au milieu d'une couche d'air animée elle-même d'un mouvement. Le ballon prendrait une vitesse absolue, qui serait la résultante de la vitesse de la couche d'air, et de sa vitesse propre par rapport à cette couche (§ 334). Pour que le ballon pût ainsi se mouvoir dans telle direction qu'on voudrait, il faudrait que sa vitesse de translation, par rapport à l'air environnant, ne fût pas trop faible relativement à la vitesse de cet air. Si l'on voulait, par exemple, qu'il marchât en sens contraire du courant d'air au milieu duquel il se trouve, il faudrait lui communiquer une vitesse relative plus grande que celle de ce courant. On voit par là que le mouvement d'un ballon ne pourra être produit à volonté dans toutes les directions, qu'autant

qu'il se trouvera dans une couche d'air immobile, ou animée d'une faible vitesse. Or on sait, d'après les relations des voyages aérostatiques, qu'il est rare que les couches d'air dans lesquelles ces voyages se sont effectués n'aient eu qu'une faible vitesse; habituellement un ballon est emporté en moins d'une heure à un grand nombre de kilomètres du point de départ. On doit donc regarder la question de la direction des ballons à volonté comme n'étant susceptible d'une solution pratique que pour des circonstances atmosphériques qui ne se présentent qu'exceptionnellement. Le plus souvent un ballon, muni d'un appareil de propulsion, ne pourrait pas lutter contre le mouvement de l'air au milieu duquel il serait plongé. Ajoutons à cela qu'on ne pourrait pas même espérer de réaliser une véritable navigation aérienne, à la condition d'attendre, pour le départ, que l'atmosphère fût dans des conditions convenables; car, d'une part, on serait souvent obligé d'attendre très-longtemps, et d'une autre part il arriverait ordinairement que l'atmosphère ne se maintiendrait pas dans de telles conditions, pendant la durée du voyage qu'on voudrait effectuer.

On peut établir un parallèle entre la navigation ordinaire et la navigation aérienne. Les bateaux et les navires, mus par des rames, des roues, ou des hélices, peuvent marcher dans tous les sens sur une eau tranquille; ils peuvent aussi être dirigés à volonté sur une eau courante, à la condition que la vitesse du courant ne dépasse pas une certaine limite. Il en sera de même d'un ballon muni d'un appareil de propulsion : il pourra se mouvoir dans toutes les directions possibles, si l'air qui l'environne est immobile, ou animé d'une vitesse inférieure à une certaine limite. Mais la plupart des courants d'eau ont une vitesse plus faible que celle au delà de laquelle un navire ne pourrait pas remonter le courant; tandis qu'au contraire les courants atmosphériques sont généralement de beaucoup plus rapides que ceux contre lesquels on pourrait espérer de lutter avec un ballon muni d'un appareil de propulsion. Habituellement un ballon que l'on voudrait diriger à volonté dans l'atmosphère serait dans les mêmes conditions qu'un bateau à vapeur auquel on voudrait faire remonter un torrent.

MACHINES QUI SERVENT A ÉLEVER LES LIQUIDES.

§ 337. L'élévation des liquides, et principalement de l'eau, entre dans une forte proportion parmi les divers travaux que l'on exécute à l'aide de machines. Tantôt on a besoin d'enlever

l'eau de cavités plus ou moins profondes, afin de pouvoir s'y installer et y travailler, soit à des constructions, soit à des exploitations de mines; tantôt on veut élever, à une faible hauteur, une partie des eaux d'une rivière, pour les employer à des irrigations; tantôt on veut faire monter de l'eau ou différents liquides, soit pour les usages domestiques, soit pour les besoins d'un établissement industriel. Un grand nombre de machines ont été imaginées pour remplir ces divers objets; nous allons en faire connaître les dispositions générales.

La quantité de travail nécessaire pour élever une certaine masse d'un liquide à une hauteur déterminée s'obtiendra toujours en multipliant le poids du liquide à élever, évalué en kilogrammes, par la hauteur à laquelle il doit être élevé, estimée en mètres. Le nombre ainsi obtenu représentera la quantité de travail moteur qu'on devra appliquer à une machine, quelle que soit sa nature, pour qu'elle puisse produire le travail utile qui est représenté par l'élévation de la masse liquide à la hauteur voulue, en supposant toutefois qu'il n'y ait aucune perte de travail occasionnée par l'emploi de cette machine. En réalité, le travail moteur appliqué à une machine destinée à l'élévation d'un liquide sera toujours supérieur au travail utile que cette machine effectuera, parce qu'il est impossible d'éviter complétement les pertes de travail. Ces pertes sont dues en général: 1° aux frottements des parties solides de la machine les unes contre les autres; 2° aux chocs qui peuvent se produire entre ces parties solides; 3° au frottement du liquide contre les parois entre lesquelles il se meut; 4° aux changements brusques de grandeur ou de direction qui peuvent survenir dans la vitesse du liquide; 5° enfin à la vitesse que le liquide possède encore lorsqu'il est arrivé à la hauteur à laquelle il devait être élevé, vitesse qui est entièrement inutile, et qui n'a pu être donnée au liquide qu'aux dépens d'une portion du travail moteur appliqué à la machine. Quand on veut établir une machine pour élever un liquide, on doit toujours avoir en vue ces diverses causes de perte de travail, afin d'en atténuer l'effet autant que possible, au moyen de dispositions convenables.

Les diverses machines qui servent à élever les liquides diffèrent les unes des autres en raison du volume plus ou moins grand du liquide qu'elles doivent déplacer, et de la hauteur plus ou moins considérable à laquelle elles doivent le monter. Mais il existe aussi plusieurs espèces de machines qui peuvent être employées indistinctement dans les mêmes circonstances; pour choisir, entre ces diverses machines, celle qu'on devra adopter, on les

comparera sous le rapport de la perte totale de travail que chacune d'elles pourra occasionner par sa nature, et aussi sous le rapport de la facilité plus ou moins grande d'installation et de manœuvre que chacune d'elles présentera. Si la machine ne doit fonctionner que momentanément, pour être enlevée ensuite, la facilité d'installation devra entrer pour beaucoup dans le choix qu'on fera: si au contraire la machine doit demeurer dans le lieu où on l'installera, et y fonctionner pendant un temps un peu long, on devra surtout avoir en vue de diminuer, autant que possible, les pertes de travail, et adopter celle qui sera capable de produire le plus d'économie sous ce rapport.

§ 338. **Chapelet.** — Le *chapelet* est une machine destinée à élever l'eau à une petite hauteur : on l'emploie surtout pour les épuisements qu'on a besoin d'effectuer dans les lieux où l'on construit au-dessous du niveau d'un cours d'eau, par exemple, dans les constructions des ponts et des moulins à eau. A cet effet, on établit un barrage, de manière à isoler le lieu où la construction doit se faire du reste du cours d'eau; puis, à l'aide du chapelet, on enlève l'eau contenue a l'intérieur de ce barrage. On renouvelle d'ailleurs l'action de la machine de temps en temps, pendant la durée des travaux, afin de retirer l'eau qui filtre peu à peu à travers le barrage, et qui en s'accumulant pourrait gêner les ouvriers.

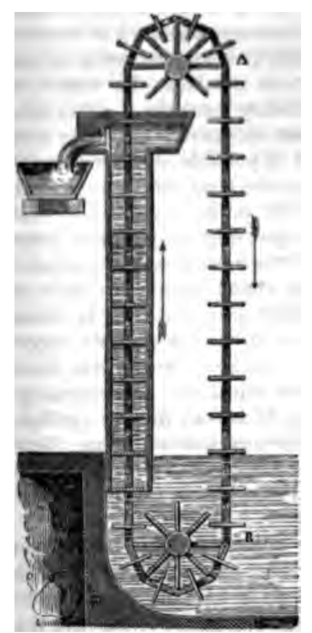


Fig. 400.

Le chapelet consiste en une chaîne sans fin (fig. 400), formée de chaînons de fer articulés les uns aux autres, et munie de disques qui sont fixés perpendiculairement au milieu de chaque chaînon. Cette chaîne s'engage sur le contour de deux roues A et B. En faisant tourner la roue A, on entraîne la chaîne, qui fait elle-même tourner la roue B. Dans ce mouvement, les diverses portions de la chaîne montent d'un côté, et descendent de l'au-

tre côté, comme l'indiquent les flèches. La partie ascendante de cette chaîne se trouve engagée dans un tuyau, dont les dimensions transversales sont un peu plus grandes que celles des disques fixés aux chaînons, et qui plonge par sa partie inférieure dans l'eau à épuiser. Chaque fois qu'un disque, en montant, vient pénétrer dans le tuyau, il isole au-dessus de lui une certaine quantité d'eau qui s'y était introduite ; à mesure qu'il s'élève, il fait monter cette eau avec lui, et elle se trouve ainsi soulevée jusqu'à la partie supérieure du tuyau, où elle se déverse latéralement. Les dimensions des disques du chapelet sont un peu moins grandes que celles de la section intérieure du tuyau, afin d'éviter les frottements ; mais la différence doit être aussi petite que possible, sans quoi l'eau passerait en trop grande quantité dans les intervalles qui existeraient entre les disques et le tuyau, et il en résulterait une diminution correspondante dans la masse d'eau élevée.

Souvent, au lieu de disposer le chapelet verticalement, comme nous venons de le voir, on lui donne une position inclinée (fig. 401).

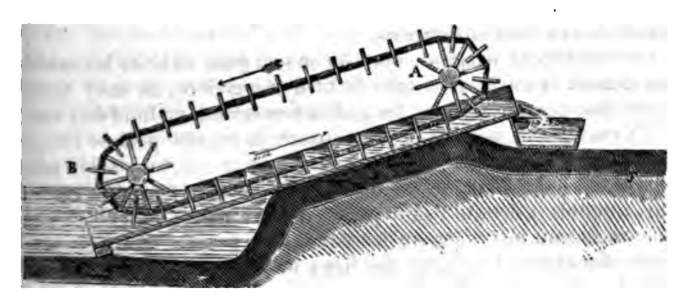


Fig. 401.

Dans ce cas, le côté supérieur du tuyau peut être enlevé, en sorte qu'il se réduit à un simple canal de bois, dans lequel circule, en montant, l'une des parties de la chaîne sans fin qui constitue le chapelet.

§ 339. **Noria.** — La *noria* est une machine qui a une grande analogie avec le chapelet. Elle se compose, comme lui, d'une chaîne sans fin qui s'engage sur le contour de deux roues, et que l'on met en mouvement de la même manière. Mais, au lieu que la chaîne porte des disques qui doivent faire monter l'eau au-dessus d'eux, dans un tuyau ou dans un canal incliné, elle est munie dans toute sa longueur de godets qui sont destinés à contenir

le liquide à élever. Ces godets montent et descendent successivement, comme les disques du chapelet. Lorsqu'ils sont à la partie inférieure de leur course, ils s'emplissent d'eau; ils montent avec l'eau qu'ils contiennent, et doivent avoir par conséquent, en montant, leur ouverture tournée vers le haut; arrivés près de la roue supérieure, ils tournent autour de cette roue, se vident en s'inclinant, puis redescendent, ayant l'ouverture tournée vers le bas, pour venir s'emplir de nouveau dans la masse d'eau qui doit être élevée. Le tuyau vertical, ou le canal incliné, dans lequel s'engagerait la partie ascendante de la chaîne sans fin, dans le chapelet, n'existe pas dans la noria; sa présence serait tout à fait inutile.

La noria n'est pas seulement employée à des épuisements d'eau. On s'en sert souvent, dans les établissements industriels, pour élever différents liquides à des étages supérieurs, et même aussi pour élever des corps solides réduits à l'état de poussière. C'est ainsi que, dans les moulins à farine, on emploie des norias pour faire monter le mélange de son et de farine, qui sort des meules, et l'amener dans les appareils destinés à opérer la séparation de ces deux substances.

Les machines à draguer, dont on se sert pour enlever les sables qui gênent la navigation dans le lit d'une rivière, ne sont autre chose que des norias, dont les godets descendent au fond de l'eau, et s'y emplissent de sable, qu'ils remontent ensuite pour le verser dans un bateau destiné à l'emmener. Dans ce cas, les godets sont percés sur toute leur surface d'un grand nombre de petits trous, par lesquels s'écoule l'eau qui s'y trouve mêlée au sable. Ces machines sont installées sur les flancs d'un bateau, que l'on promène dans toute l'étendue des lieux où le lit de la rivière a besoin d'être approfondi; elles sont mises en mouvement, soit par un manége à cheval, soit par une machine à vapeur que porte le bateau dragueur.

§ 340. **Vis d'Archimède.** — On emploie encore très-souvent, pour effectuer des épuisements à de petites profondeurs, une machine en forme de vis, qui a été imaginée par Archimède, et qui porte son nom. Pour faire comprendre comment cette machine fonctionne, réduisons-la à sa plus grande simplicité. Concevons qu'un tube de verre ait été enroulé autour d'un cylindre de manière à y prendre la forme d'un filet de vis (fig. 402), et que l'appareil ainsi construit, étant installé dans une position inclinée, puisse recevoir un mouvement de rotation autour de l'axe du cylindre, à l'aide d'une manivelle fixée à son extrémité supérieure. Quand on fera tourner cette machine, l'extrémité inférieure *a* du tube de

verre décrira une circonférence de cercle dont le plan perpendiculaire à l'axe du cylindre sera incliné à l'horizon. Si une portion de cette circonférence plonge dans l'eau, l'extrémité *a* du tube de verre pénétrera dans ce liquide, puis en sortira, y pénétrera de

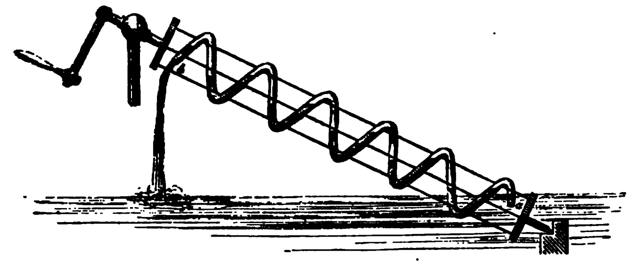


Fig. 402.

nouveau, et ainsi de suite. Au moment où cette extrémité du tube sortira de l'eau, le tube contiendra une certaine quantité de liquide, qui se trouvera ainsi isolée, et qui, pendant la rotation de la machine, viendra à chaque instant occuper la partie inférieure de la spire dans laquelle elle est engagée. Cette eau, contenue dans le tube, marchera donc progressivement le long du cylindre, et finira par s'écouler à sa partie supérieure.

A chaque tour que l'on fera faire au cylindre, une nouvelle quantité de liquide s'engagera dans le tube, qui en contiendra ainsi dans chacune de ses spires. Ces masses d'eau, qui sont élevées simultanément, sont séparées les unes des autres par l'air qui s'est introduit dans le tube pendant que son extrémité *a* était au-dessus de la surface libre du liquide à élever. En étudiant avec soin la marche de l'appareil, on reconnaît que la quantité d'air qui s'introduit ainsi dans le tube n'est pas suffisante pour remplir complétement l'espace compris entre deux masses d'eau successives, en conservant la même force élastique; cet air est donc obligé de se dilater, et il en résulte que la pression atmosphérique, qui s'exerce librement par l'extrémité *b* du tube, fait retomber une portion de chaque masse d'eau dans la spire qui est au-dessous d'elle. Pour éviter cet inconvénient, on peut pratiquer sur le tube de verre, de distance, en distance, de très-petits trous qui permettent à l'air extérieur d'entrer, sans cependant laisser sortir l'eau; par cette disposition, au moment où l'air compris entre deux masses d'eau tend à se dilater, une portion de l'air extérieur pénètre par quelques-uns de ces trous, et la force élastique

de l'air intérieur ne s'abaisse pas notablement au-dessous de celle de l'air extérieur.

Il est indispensable que l'extrémité *a* du tube de verre sorte de l'eau, à chaque tour que l'on fait faire au cylindre, sans quoi l'eau qui s'introduirait dans le tube ne serait pas séparée du reste du liquide, et ne pourrait pas être élevée; on voit en effet que le tube de verre et le réservoir inférieur dans lequel il plonge, formeraient dans ce cas un système de vases communiquants, et que, par conséquent, les surfaces libres, dans le tube et dans le réservoir, devraient toujours se trouver à un même niveau. La présence des petites ouvertures pratiquées tout le long du tube, dont nous avons parlé il n'y a qu'un instant, peut cependant modifier ce résultat, en permettant à l'air extérieur de s'introduire dans le tube, et d'y séparer une certaine quantité d'eau du reste du liquide.

Les vis d'Archimède, telles qu'on les emploie pour effectuer des épuisements, ne sont pas construites comme celle dont nous venons de parler. Elles se composent d'un cylindre intérieur qui forme le noyau (fig. 403); d'une cloison contournée autour de ce noyau, en forme de filet de vis; et enfin d'une enveloppe cylin-

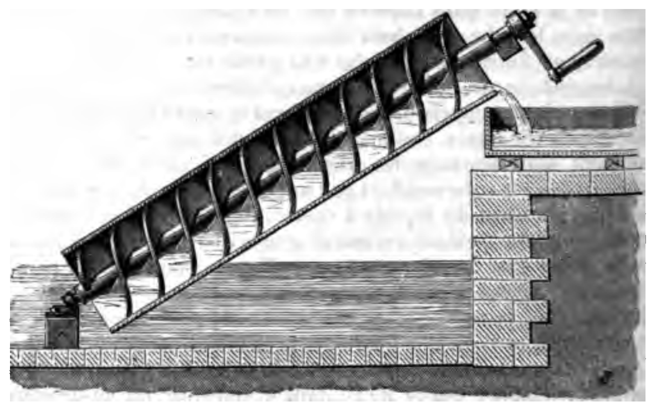


Fig. 403.

drique, qui est fixée sur les bords extérieurs de cette cloison. Une moitié de cette enveloppe a été enlevée sur la figure, pour faire voir la disposition intérieure, ainsi que la manière dont l'eau s'y place sur les diverses spires de la cloison. Souvent, au lieu

d'une seule cloison intérieure, on en met deux, et même trois, qui s'étendent dans toute la longueur du noyau, en tournant autour de lui dans le même sens, et restant parallèles entre elles : c'est ce que montre la figure 403, où l'on voit que la vis est formée de deux cloisons de ce genre. Habituellement, dans les vis d'Archimède construites de cette manière, l'air peut circuler librement à l'intérieur, tout le long du noyau, et l'on ne rencontre pas, en conséquence, les inconvénients qui pourraient résulter de la dilatation de l'air emprisonné entre les masses d'eau que contiennent deux spires successives. Par la même raison, il ne devient plus indispensable que la base inférieure du cylindre ne plonge qu'en partie dans l'eau qu'il s'agit d'élever.

§ 341. Vis hollandaise. — On emploie, beaucoup, en Hollande, une machine d'épuisement qui n'est qu'une modification de la vis d'Archimède. Imaginons que, dans cette vis (fig. 403), on ait supprimé l'enveloppe cylindrique qui ferme extérieurement l'espace compris entre les spires successives des cloisons, il ne restera plus que ces cloisons et le noyau central auquel elles sont fixées. Concevons de plus qu'une pareille vis soit installée à l'intérieur d'un canal cylindrique, dans lequel elle puisse tourner, de manière que les bords extérieurs des cloisons dont elle est formée, soient presque en contact avec les parois de ce canal : on aura ainsi la vis hollandaise. En lui donnant un mouvement de rotation, on élèvera de l'eau tout aussi bien qu'avec la vis d'Archimède. Une portion de l'eau élevée pourra retomber dans le réservoir inférieur, en passant entre les bords des cloisons et les parois du canal ; pour diminuer la perte de travail qui résulte de cette circonstance, on a soin de ne laisser, entre la vis et le canal cylindrique dans lequel elle tourne, que le jeu nécessaire pour qu'il n'y ait pas de frottement. L'inconvénient qui vient d'être signalé est compensé d'ailleurs par un avantage de la vis hollandaise sur la vis d'Archimède. Dans cette dernière machine, tout le poids de l'eau que contient la vis est supporté par son axe ; dans la vis hollandaise, au contraire, les parois du canal qui l'enveloppe en partie supportent une des composantes du poids de cette eau, composante qui est dirigée perpendiculairement à la longueur du canal, tandis que la vis n'a à supporter que l'autre composante qui est parallèle à son axe : il en résulte que les frottements de l'axe sur ses supports sont moins grands dans la vis hollandaise que dans la vis d'Archimède.

Des vis de ce genre sont employées en grand nombre en Hollande, pour rejeter par-dessus les digues les eaux qui se répandent sur des terrains bas, et qui proviennent soit des pluies, soit

des infiltrations. Ces machines sont mises en mouvement par des moulins à vent.

On emploie assez souvent des vis entièrement analogues aux vis hollandaises pour transporter à une petite distance des corps solides réduits en poussière. A cet effet, on installe une vis horizontalement, dans une sorte de canal dont elle occupe toute la longueur. Cette vis, à laquelle on donne un mouvement de rotation autour de son axe, saisit les poussières accumulées dans un réservoir placé à l'une des extrémités du canal : elles se trouvent ainsi engagées entre ses spires, et sont conduites jusqu'à l'autre extrémité, où elles tombent dans le second réservoir. Dans les moulins à farine, on se sert concurremment de la vis dont nous parlons et de la noria (§ 339), pour transporter d'un point à un autre de l'établissement le mélange de son et de farine qui sort des meules : la première est affectée spécialement au transport de ce mélange dans un sens horizontal, et la seconde au transport dans le sens vertical.

§ 342. **Roue à palettes.** — On se sert quelquefois, pour élever l'eau à une faible hauteur, d'une grande roue dont la circonférence est garnie de palettes planes. La figure 404 représente une roue de ce genre, qui est établie à la gare de Saint-Ouen, près Paris. Elle est destinée à faire monter de l'eau prise dans la Seine, pour entretenir un niveau suffisamment élevé à l'intérieur de la gare. A partir du bas de la roue, les palettes, en remontant, se meuvent dans un coursier cylindrique; de chaque côté existe également un mur vertical qui s'élève à une hauteur convenable : en sorte que les palettes se trouvent ainsi emboîtées exactement dans leur contour, et l'eau qui s'engage entre elles est obligée de les suivre dans leur mouvement ascendant. Lorsqu'une palette chargée d'eau arrive en A, cette eau s'écoule par-dessus la crête du coursier circulaire, et se rend de là dans la gare. On a donné aux palettes une certaine inclinaison, par rapport au rayon auquel elles correspondent, afin de faciliter cet écoulement.

La roue est mise en mouvement par une machine à vapeur, qui agit sur elle par l'intermédiaire d'une roue dentée que l'on voit sur la figure. Cette roue dentée engrène avec les dents que porte intérieurement une des couronnes auxquelles sont adaptées les palettes.

D'après la manière dont l'action de la machine à vapeur est ainsi transmise à la roue à palettes, on voit que l'axe de cette roue n'est pas très-fortement chargé par la masse d'eau qu'elle soulève, et qu'en conséquence la pression de cette masse d'eau sur

les palettes ne donne pas lieu à des frottements beaucoup plus grands que si la roue marchait à vide; car la roue dentée qui fait tourner la roue à palettes exerce sur elle une pression de bas en haut qui détruit en grande partie la pression résultant du poids de l'eau soulevée.

§ 313. **Roue élévatoire.** — Les figures 405 et 406 représentent



Fig. 404. (*Échelle de 8 millimètres pour mètre.*)

une roue d'une autre espèce, qui est destinée à remplir le même objet que celle dont nous venons de parler. Cette roue, à laquelle on donne le nom de *roue élévatoire*, porte à sa circonférence un grand nombre de compartiments ou augets qui doivent contenir l'eau à élever. La roue étant animée d'un mouvement de rotation dans un sens convenable, les augets viennent plonger dans le bief A (fig. 405); ils s'y emplissent d'eau, par l'extérieur de la

roue, ils montent pleins jusqu'à une certaine hauteur; enfin ils versent l'eau dans les caisses B, C, par des ouvertures pratiquées

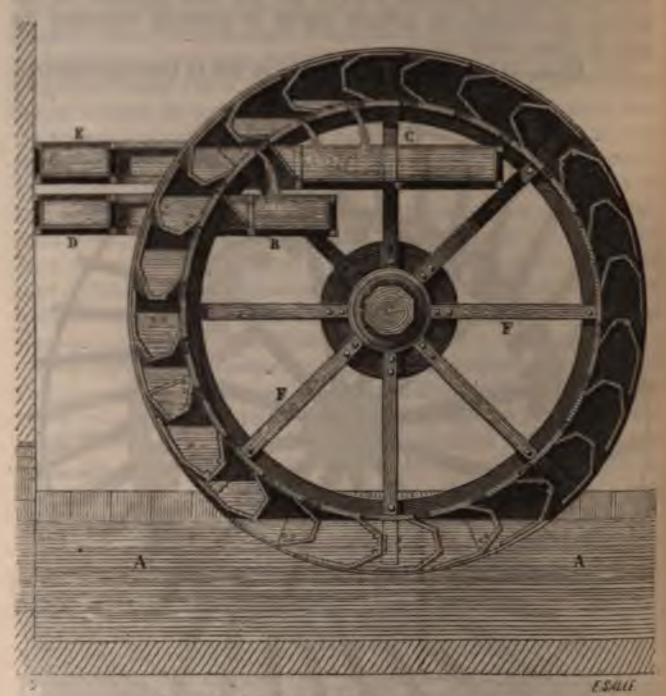


Fig. 405. (*Échelle de 12 millimètres pour mètre.*)

à l'intérieur de la roue, et de là elle se rend dans les canaux D, E, dans lesquels elle s'écoule. Les bras F, qui relient le contour de la roue à l'arbre central, n'occupent pas toute la largeur de la roue (fig. 406); c'est ce qui permet aux caisses B, C, de pénétrer à son intérieur, de part et d'autre de ces bras, sans cependant gêner son mouvement. Un moteur hydraulique, placé à côté de la roue élévatoire, fait tourner l'arbre G; et le mouvement est transmis à la roue par l'intermédiaire d'un engrenage.

On voit qu'ici l'arbre de la roue supporte tout le poids de l'eau élevée, ce qui détermine des frottements considérables. Mais,

d'un autre côté, il n'y a pas à craindre les pertes d'eau qui se produisent toujours dans la roue précédente, entre les palettes et le coursier, pertes qu'on ne peut pas éviter complétement par une bonne construction, et qui obligent de donner à la roue une vitesse un peu grande.

La roue que représentent les figures 405 et 406 est établie à Ciry-Salsogne, près de Soissons : elle y est employée à élever une

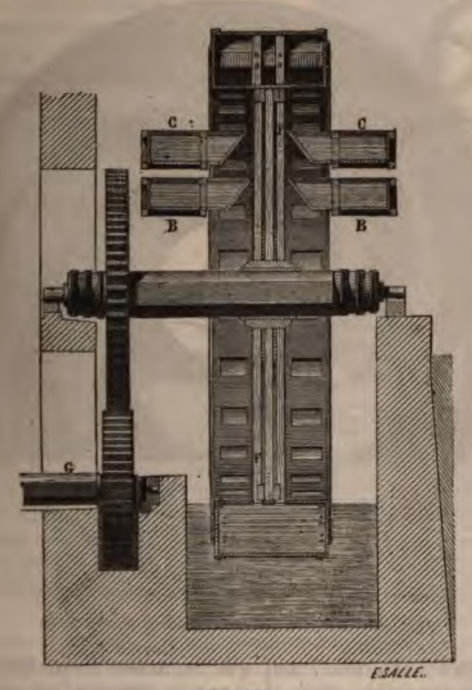


Fig. 406.

partie des eaux de la rivière de Vesle, pour les faire servir à des irrigations. Le canal E (fig. 405) conduit l'eau sur les points les plus élevés des terrains à irriguer ; le canal D, alimenté par les caisses B qui reçoivent les premières masses d'eau sorties des augets, mène cette eau sur des parties plus basses.

§ 344. **Tympan.** — Le *tympan* (fig. 407 et 408) a de l'analogie avec la *roue élévatoire* ; il en diffère en ce que, puisant

l'eau à sa circonférence, il la déverse près de son axe. Il consiste en un tambour creux, mobile autour de son axe, et dans lequel sont des cloisons contournées en spirale; ces cloisons partent du centre, et s'étendent jusqu'à la circonférence. Le tympan plonge, par sa partie inférieure, dans l'eau qu'il s'agit d'élever; cette eau s'introduit entre les cloisons, et s'y maintient au même



Fig. 407. (*Echelle de 13 millimètres pour mètre.*)

niveau qu'à l'extérieur, tant que la masse d'eau intérieure ne se trouve pas isolée. Mais, lorsque le tympan est animé d'un mouvement de rotation, dans le sens de la flèche, les extrémités des cloisons viennent sortir de l'eau les unes après les autres; les masses d'eau contenues dans chacune d'elles se trouvent donc successivement séparées du reste du liquide. Chaque masse d'eau, étant ainsi isolée, tend constamment à se placer au point le plus bas de la cloison courbe qui la contient; à mesure que le tympan tourne, cette eau se trouve soulevée, et elle coule en même temps le long de la cloison, de manière à se rapprocher

du centre; enfin elle arrive bientôt au niveau de deux ouvertures centrales qui sont pratiquées sur les deux faces du tympan, et elle s'écoule au dehors, de part et d'autre, par ces ouvertures.

Le tympan représenté par les figures 407 et 408 fonctionne à Avignon pour élever les eaux qui servent aux irrigations des rizières de la Camargue. Une roue dentée existe sur tout son contour et au milieu de sa largeur ; cette roue engrène avec une autre plus petite qui reçoit son mouvement du moteur et le transmet ainsi au tympan.

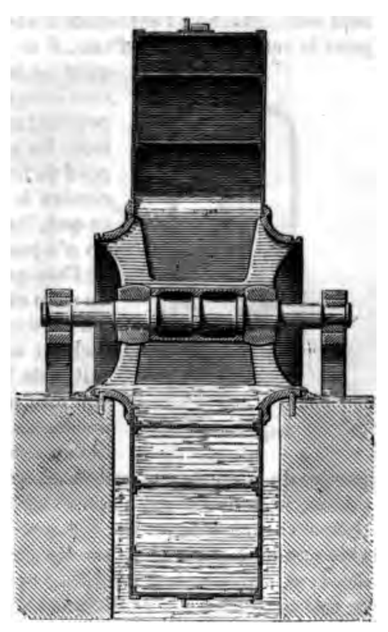


Fig. 408.

§ 345. **Seaux.** — Pour élever de l'eau à une hauteur un peu grande, et notamment pour puiser l'eau d'un puits, on emploie très-souvent un *seau* que l'on accroche à l'extrémité d'une corde suffisamment longue. On laisse descendre la corde, avec le seau qui la termine, jusqu'à ce qu'il arrive à l'eau dont il doit enlever une partie. Dès qu'il a plongé d'une petite quantité dans cette eau, il se couche sur le côté, s'emplit peu à peu de liquide, et s'enfonce bientôt complétement ; alors on retire la corde, et elle remonte le seau plein d'eau.

Il est assez incommode d'opérer en tenant directement dans ses mains la corde à laquelle le seau est attaché, parce que, pour éviter le frottement du seau contre les parois du puits, pendant qu'on le remonte, on est obligé de se pencher de manière à éloigner la corde de ces parois. Aussi opère-t-on habituellement d'une autre façon. Le plus souvent la corde s'enroule sur un treuil à manivelle (§ 54) qui s'étend horizontalement au-dessus du puits, et l'on remonte le seau en faisant tourner la manivelle. Outre la commodité que présente cette disposition, on y trouve l'avantage de pouvoir remonter un seau de plus grandes dimensions, soit en employant

un treuil dont le rayon soit notablement plus petit que le rayon de la manivelle, soit en ne faisant agir la manivelle sur le treuil que par l'intermédiaire de roues dentées.

Quand on opère, comme nous venons de le dire, au moyen d'un seul seau, attaché à l'extrémité d'une corde, que l'on descend vide pour le remonter plein d'eau, il se présente deux inconvénients qu'il est bon de chercher à éviter, surtout lorsqu'on doit répéter la manœuvre pendant un certain temps sans interruption. Le premier consiste en ce qu'on perd du temps pendant qu'on laisse descendre le seau vide; le second tient à ce que, lorsqu'on remonte le seau plein, on n'a pas seulement à vaincre le poids de l'eau qu'on élève, mais aussi le poids du seau et celui de la corde. On fait disparaître ces deux inconvénients, en attachant un seau à chacune des extrémités de la corde, et la faisant passer sur une poulie dont la chape est fixée au-dessus de l'orifice du puits (fig. 409). Si l'on tire de haut en bas l'une des deux parties de la corde qui se détache verticalement de la gorge de la poulie, le seau qui est à son extrémité descend; mais en même temps l'autre monte. On voit que, par là, chaque seau descend vide pendant que l'autre monte plein d'eau; et de plus les poids des deux seaux se font équilibre par l'intermédiaire de la poulie, ce qui fait qu'on n'a réellement à vaincre que le poids de l'eau qu'on élève. Quant au poids de la corde, qui est souvent de peu d'importance, il agit tantôt comme force résistante, tantôt comme force motrice; les poids des deux portions de cette corde qui sont situées de part et d'autre de la poulie se neutralisent en partie: l'excès de l'un de ces poids sur l'autre agit seul pour ralentir ou accélérer le mouvement, suivant que le seau plein est plus bas ou plus haut que le seau vide.



Fig. 409.

§ 346. **Manége des maraîchers.** — Lorsqu'on a besoin d'extraire d'un puits une quantité d'eau assez grande, on peut encore se servir de seaux; mais alors on leur donne de grandes dimensions, et ils prennent le nom de *tonnes*. En outre on remplace la force des hommes par celle des chevaux ou de la vapeur, pour les faire manœuvrer dans le puits.

Nous pouvons donner comme exemple des machines dont on se sert dans ce cas, le *manége des maraîchers* (fig. 410), qui est

très-répandu dans les environs de Paris. Deux poulies sont disposées à côté l'une de l'autre, au-dessus du puits, et à une petite distance se trouve un arbre vertical, qui peut tourner sur lui-même, et qui porte un tambour à sa partie supérieure. Une corde fait deux ou trois tours sur ce tambour, et s'en détache de

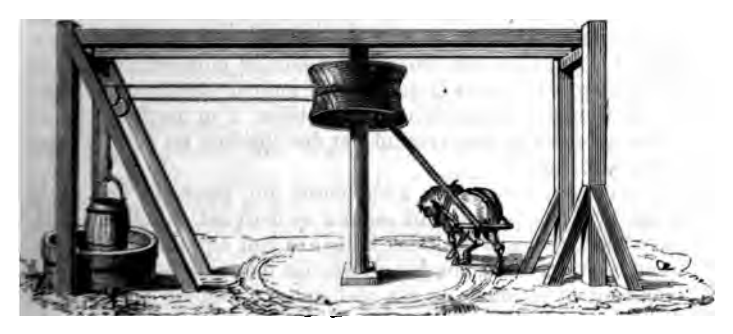


Fig. 410.

part et d'autre, pour venir passer dans les gorges des deux poulies; aux deux extrémités de cette corde sont suspendues les deux tonnes qui doivent servir à puiser l'eau. On attelle un cheval à l'extrémité d'un long levier qui est fixé à l'arbre du tambour. Ce cheval, en tirant, fait tourner l'arbre; la corde qui enveloppe le tambour s'enroule d'un côté et se déroule de l'autre; et la tonne vide descend pendant que la tonne pleine monte. Lorsque le cheval, en tournant ainsi dans un sens, a élevé cette dernière tonne jusqu'à l'orifice du puits, on la vide en faisant couler l'eau qu'elle contient dans un réservoir placé à côté du puits; pendant ce temps la tonne qui est au fond du puits s'est emplie d'eau : on fait alors marcher le cheval en sens contraire, et les choses se passent comme précédemment.

Chaque tonne est munie, comme les seaux ordinaires, d'une anse par laquelle elle est suspendue à l'une des extrémités de la corde; mais cette anse n'est pas attachée en deux points diamétralement opposés du bord supérieur de la tonne ; elle descend plus bas et saisit deux espèces de tourillons qui sont fixés à la tonne de part et d'autre, à une faible distance au-dessus du milieu de sa hauteur. Au moyen de cette disposition, on voit que la tonne pleine se maintiendra bien d'elle-même dans une position convenable pour ne pas perdre l'eau qu'elle contient; mais qu'on n'éprouvera pas de difficulté à la faire basculer autour de ces deux

tourillons pour la vider, parce que son centre de gravité se trouvera très-rapproché de la ligne qui joint ces points de suspension.

§ 347. **Machine à molettes.** — Pour faire monter les tonnes pleines et descendre les tonnes vides, dans les puits de mines, soit pour l'épuisement des eaux, soit pour l'extraction des minerais, on se sert de machines entièrement pareilles au manége des maraîchers, mais construites avec de plus grandes dimensions. Les deux poulies établies au-dessus du puits portent le nom de *molettes*; et c'est de là que vient le nom de *machines à molettes* qu'on donne à la machine tout entière. Une machine de ce genre est mise en mouvement par des chevaux ou par une machine à vapeur.

Ici, comme dans le cas d'une corde qui passe sur une seule poulie, et qui supporte deux seaux à ses deux extrémités (fig. 409, page 500), les poids des deux tonnes se font équilibre mutuellement; en sorte que si l'on fait abstraction du poids du câble auquel elles sont suspendues, on n'a réellement à vaincre que le poids de l'eau contenue dans la tonne qui monte. Quant au poids du câble, ainsi que nous l'avons déjà dit, il agira tantôt comme puissance, tantôt comme résistance, suivant que la tonne qui monte sera plus haut ou plus bas dans le puits que la tonne qui descend : et la force qui en résultera sera égale à la différence des poids des deux parties de ce câble qui descendent dans le puits, depuis les molettes jusqu'aux tonnes. Cette action du poids du câble ne peut pas être négligée, surtout si le puits est profond. Elle ne donne lieu, il est vrai, à aucune perte de travail, si ce n'est celle qui résulte d'une augmentation des frottements; car, si elle détermine un accroissement de résistance pendant une partie du mouvement de la machine, plus tard elle produit, au contraire, une diminution dans la résistance qu'on aurait à vaincre sans elle, et il y a une compensation exacte. Mais il résulte de cette action variable du poids du câble, que la résistance totale à vaincre décroît constamment, pendant tout le temps qu'une tonne pleine met à monter du fond du puits à son orifice. Pour obvier à cet inconvénient, on fait en sorte que la résistance agisse sur le tambour de la machine, à l'extrémité d'un bras de levier de plus en plus grand, à mesure que son intensité diminue; à cet effet, on forme le tambour de deux parties coniques, sur chacune desquelles doit s'enrouler et se dérouler successivement une des portions du câble. Le câble, s'enroulant sur un de ces cônes, dispose ses spires successives à côté les unes des autres, et sur des parties de la surface dont le diamètre augmente de plus en plus: le contraire a lieu lorsqu'il se déroule.

Il est clair qu'il n'est pas indispensable d'avoir un seul câble qui fasse plusieurs tours sur le tambour, pour s'en détacher de part et d'autre, venir passer sur les molettes, et descendre dans le puits de manière à supporter les deux tonnes par ses deux extrémités; ordinairement on en a deux, un pour chaque tonne. Chacun de ces deux câbles est attaché au tambour par une de ses extrémités; ils s'enroulent en sens contraire sur ce tambour, et sont disposés de manière que lorsque l'un des deux est déroulé, l'autre soit au contraire enroulé, de telle sorte que l'une des tonnes soit à l'orifice du puits lorsque l'autre est au fond.

§ 348. Pompes. — Dans les diverses machines destinées à élever les liquides, dont nous avons parlé, jusqu'à présent, il existe des pièces mobiles qui puisent le liquide dans le réservoir inférieur, l'élèvent progressivement, et ne l'abandonnent que lorsqu'il est parvenu à la hauteur voulue. Les *pompes* ont aussi pour objet d'élever des liquides, mais elles fonctionnent d'une tout autre manière. Les pièces mobiles qui entrent dans leur composition, et qui reçoivent presque toujours un mouvement de va-et-vient, ne se meuvent habituellement que dans une très-petite portion de la hauteur totale à laquelle le liquide doit être élevé.

Une pompe consiste, en général, dans une capacité fermée, dont les dimensions intérieures peuvent augmenter ou diminuer à volonté, et dont la communication avec les tuyaux dans lesquels doivent se mouvoir les liquides est successivement établie et interrompue à des moments convenables. On donne le nom de *corps de pompe* à la partie fixe de cette capacité, qui est ordinairement cylindrique. Le *piston* est une pièce mobile qui se place dans le corps de pompe, et s'adapte exactement contre ses parois; en se mouvant le long des parois, il fait varier l'étendue de l'espace intérieur auquel il sert de limite. C'est au moyen de *soupapes* que l'on établit une communication intermittente du corps de pompe avec les divers tuyaux nécessaires au jeu de la pompe.

§ 349. Les soupapes que l'on emploie ont des formes très-variées; nous n'indiquerons que les principales.

La *soupape à clapet* (fig. 411) consiste en une plaque métallique, mobile autour d'une charnière, de manière à pouvoir s'appliquer exactement sur les bords d'une ouverture pratiquée dans la pièce qui porte cette charnière; cette plaque est ordinairement doublée de cuir, afin qu'il puisse s'établir un contact plus intime entre elle et les bords de l'ouverture qu'elle doit fermer. Souvent la soupape à clapet n'a pas de charnière, et est formée d'un

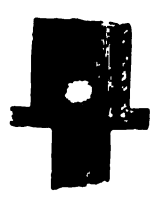

Fig. 411.

simple morceau de cuir dont un des bords est cloué à côté de l'ouverture que cette soupape doit fermer. Dans ce cas, la flexibilité du cuir tient lieu de charnière, et pour que cette flexibilité n'empêche pas la soupape de fermer exactement l'ouverture, on fixe sur sa surface supérieure une plaque métallique de moindre grande dimension, qui lui donne une rigidité suffisante, sans cependant s'opposer au mouvement qu'elle doit prendre.

La *soupape conique* (fig. 412), consiste en un tronc de cône métallique, qui peut fermer exactement une ouverture dont les bords sont également coniques. Cette soupape est munie d'une tige fixée en son milieu, qui sert à la diriger dans son mouvement. A cet effet, la tige de la soupape traverse une bride qui est disposée au-dessous, et elle se termine par une tête destinée à empêcher la soupape de trop s'éloigner de l'ouverture qu'elle doit fermer.


Fig. 412.

La *soupape à boulet* (fig. 413), consiste en une sphère qui ferme une ouverture circulaire, en venant s'appuyer sur ses bords. Cette soupape n'a pas besoin d'être dirigée dans son mouvement ; la régularité de forme que présentent les diverses parties de sa surface fait qu'elle ferme toujours exactement l'ouverture, de quelque côté qu'elle se présente. On est seulement obligé de disposer, au-dessus de l'ouverture, une sorte de muselière destinée à empêcher la soupape de s'en trop éloigner. Lorsqu'une soupape de cette espèce doit avoir de grandes dimensions, on la fait ordinairement creuse, afin qu'elle ne soit pas trop pesante : on peut même ainsi régler son poids de telle sorte qu'elle fonctionne de la manière la plus avantageuse.


Fig. 413

§ 350. La forme d'un piston dépend de la forme du corps de pompe dans lequel il doit se mouvoir. Le plus ordinairement le corps de pompe est un cylindre à base circulaire; alors le piston a également la forme d'un cylindre (fig. 414), dont la hauteur est beaucoup plus petite que celle du corps de pompe.


Fig. 414.

Le piston devant toucher les parois intérieures du corps de pompe par tout son contour, et devant, en outre, pouvoir glisser facilement le long de ces parois, on le garnit habituellement d'étoupes forte-

ment serrées. Ces étoupes donnent au contour du piston un certain degré de compressibilité et d'élasticité, qui lui permet de s'appliquer bien exactement sur les parois du corps de pompe, sans cependant qu'il en résulte un trop grand frottement pendant que le piston se meut. Lorsqu'un piston a fonctionné pendant quelque temps, les étoupes, s'étant usées, ne remplissent plus complétement leur objet; elles laissent un certain jeu entre elles et les parois du corps de pompe. On est obligé alors d'ajouter de nouvelles étoupes, ou bien de faire en sorte que celles qui restent soient repoussées au dehors dans tout le contour du piston, afin que ce contour reprenne un diamètre convenable. Pour qu'on puisse opérer de cette seconde manière, on forme le piston de deux espèces de disques, qui s'appliquent l'un sur l'autre, et qui peuvent être plus ou moins rapprochés l'un de l'autre, de manière à faire varier l'épaisseur du piston qu'ils constituent; les deux disques, ainsi réunis, laissent sur tout leur contour une sorte de gorge de poulie, dans laquelle on met la garniture d'étoupes: et c'est en serrant ces deux disques l'un contre l'autre, à l'aide de boulons et d'écrous, qu'on parvient à comprimer les étoupes, de manière à les repousser au dehors, à mesure que la garniture s'use.

Souvent on a besoin de pratiquer, dans le piston lui-même, des ouvertures munies de soupapes, afin d'établir et d'intercepter alternativement une communication entre les deux parties du corps de pompe qui sont séparées l'une de l'autre par le piston. Dans ce cas, on perce ordinairement le piston de deux ouvertures placées de part et d'autre de sa tige, et on leur adapte des clapets (fig. 415).

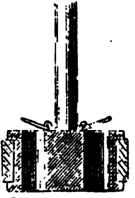


Fig. 415.

§ 351. On peut diviser les pompes en trois classes distinctes, d'après la manière dont le piston agit pour faire monter l'eau. La première comprend les *pompes aspirantes*; la seconde, les *pompes foulantes*; et enfin la troisième, les *pompes aspirantes et foulantes*.

Dans la *pompe aspirante* (fig. 416), le piston A reçoit un mouvement de va-et-vient, à l'intérieur d'un corps de pompe B, qui communique par un tuyau C avec le réservoir d'où l'eau doit être élevée. Une soupape D est établie à l'extrémité supérieure du tuyau C, et s'ouvre de bas en haut; le piston est d'ailleurs percé d'une ou de deux ouvertures, dont chacune est également munie d'une soupape. Vers le haut du corps de pompe existe un tuyau latéral E, par lequel s'écoule l'eau que fournit la machine.

Supposons que la pompe fonctionne, et voyons de quelle manière l'eau peut être élevée par le mouvement alternatif qu'on donne au piston. Si le piston s'élève, les soupapes dont il est muni se ferment, et la communication entre le haut et le bas du corps de pompe se trouve interceptée; il tend donc à produire un vide au-dessous de lui, et fait ainsi monter l'eau par aspiration (§ 253) de telle manière qu'elle reste toujours en contact avec sa face inférieure. En même temps il élève l'eau qui se trouve au-dessus de sa face supérieure, et la fait couler par le tuyau E. Pendant ce mouvement ascendant du piston, la soupape D reste constamment ouverte. Si ensuite le piston s'abaisse, l'eau qui s'est élevée dans le corps de pompe tend à redescendre dans le tuyau d'aspiration C; mais la soupape D se ferme; et l'eau, ne trouvant plus d'issue de ce côté, ouvre les soupapes du piston, et passe au-dessus de lui en le traversant. Un nouveau mouvement ascendant du piston fait couler par le tuyau E la masse d'eau qui vient ainsi de se placer au-dessus de sa face supérieure; en même temps une nouvelle quantité d'eau monte dans le corps de pompe, par aspiration, et ainsi de suite.



Fig. 416.

Si nous examinons ce qui se passe pendant le mouvement descendant du piston, nous verrons que, puisque les soupapes qu'il porte sont ouvertes, le liquide situé au-dessous de lui communique librement avec celui qui est au-dessus; et, en conséquence, les pressions qu'il en éprouve de part et d'autre doivent être sensiblement égales entre elles. Il ne peut y avoir de différence entre ces deux pressions, qu'en raison de ce que les deux faces du piston ne sont pas à une même hauteur, et aussi en raison de la difficulté plus ou moins grande que le liquide éprouve à traverser les ouvertures pratiquées dans le piston, ouvertures que l'on fait toujours aussi larges que possible. On peut donc regarder le piston,

dont le poids agit d'ailleurs en sens contraire de la résultante des pressions dont nous venons de parler, comme n'ayant aucune résistance à vaincre pour parcourir le corps de pompe de haut en bas. Mais il n'en est plus de même lorsque le piston remonte; il fonctionne alors comme un piston plein, et supporte des pressions différentes sur ses deux faces, de la part du liquide. Sur sa face supérieure, il éprouve la pression atmosphérique, augmentée du poids de la colonne d'eau qui le surmonte; sur sa face inférieure, au contraire, il éprouve la pression atmosphérique, diminuée du poids d'une colonne d'eau, qui aurait cette face pour base, et pour hauteur la distance verticale de la même face à la surface libre de l'eau dans le réservoir d'où l'eau est élevée par la pompe. Donc la différence des pressions supportées par le piston sur ses deux faces, dans son mouvement ascendant, peut être regardée comme égale au poids d'un cylindre d'eau ayant pour base la surface du piston, et pour hauteur la distance verticale du tuyau E au niveau de l'eau dans le réservoir où l'eau est puisée.

Il est clair que, pour que la pompe puisse fonctionner, il faut que la face inférieure du piston ne se trouve jamais à une distance du niveau de l'eau dans le réservoir plus grande que la hauteur de la colonne d'eau qui fait équilibre à la pression atmosphérique, hauteur qui est moyennement de $10^m,33$ (§ 245). S'il en était autrement, l'eau ne s'élèverait pas jusqu'à la face inférieure du piston : elle s'arrêterait à une certaine hauteur, soit dans le tuyau C, soit dans le corps de pompe, sans suivre le piston dans son mouvement ascendant, et formerait ainsi une sorte de baromètre à eau.

Lorsque l'on commence à faire marcher une pompe aspirante, le corps de pompe et le tuyau d'aspiration sont remplis d'air. Les premiers coups de piston ne produisent pas d'écoulement d'eau par le tuyau E; mais ils ont pour effet de retirer l'air intérieur, et de le remplacer par de l'eau. Si le piston s'abaisse d'abord, l'air contenu au-dessous de lui, dans le corps de pompe, se comprime; ne pouvant pas sortir par la soupape D qui est fermée, il ouvre les soupapes du piston, et se rend dans la partie supérieure du corps de pompe. Le piston se relevant ensuite, ses soupapes se ferment, l'air du tuyau d'aspiration ouvre la soupape D, et se répand dans le corps de pompe en se dilatant; mais la force élastique de cet air diminue en même temps, et il en résulte que l'eau s'élève d'une certaine quantité dans le tuyau C. Le piston descendant de nouveau, l'air qui vient de passer du tuyau C dans le corps de pompe traverse le piston, pour se rendre *dans l'atmosphère*; puis, lorsque le piston re-

monte, une nouvelle quantité d'air passe du tuyau C dans le corps de pompe, et l'eau monte encore dans le tuyau d'aspiration. Après quelques coups de piston, l'eau finit par s'élever jusqu'à l'intérieur du corps de pompe; les dernières portions d'air qui restent au-dessous du piston sont alors expulsées par le mouvement descendant qu'on lui donne, et la pompe commence à fournir de l'eau.

Une fois que la pompe est *amorcée* comme on vient de l'expliquer, elle reste pleine d'eau, même lorsqu'on cesse de la faire fonctionner; en sorte que, si l'on veut la faire marcher de nouveau, elle fournit de l'eau dès le premier coup de piston. Cependant, si l'on reste un temps un peu long sans y toucher, il arrive ordinairement qu'elle se vide. Cela tient à ce que les pressions, aux divers points de la colonne d'eau qui est ainsi suspendue au-dessous du piston, sont inférieures à la pression atmosphérique. Cette dernière pression s'exerçant sur toute la surface extérieure de la pompe, il en résulte que l'air s'introduit par toutes les fissures qu'il trouve et pénètre à l'intérieur; il passe notamment entre le contour du piston et la surface intérieure du corps de pompe. A mesure que de l'air entre ainsi dans la pompe, l'eau s'y abaisse; et au bout d'un temps plus ou moins long, suivant que la pompe est plus ou moins bien construite, elle prend dans le tuyau d'aspiration le même niveau que dans le réservoir où plonge ce tuyau. Nous avons dit que la face inférieure du piston ne devait jamais s'élever, au-dessus du niveau de l'eau dans le réservoir inférieur, à une hauteur plus grande que celle d'une colonne d'eau qui ferait équilibre à la pression atmosphérique. Si l'on fait attention à la manière dont le piston fonctionne pour amorcer la pompe, et si l'on tient compte des imperfections qu'une pompe présente toujours, on voit qu'on devra aussi se tenir assez notablement au-dessous de cette limite. L'expérience a fait connaître qu'on ne devait guère donner plus de 8 mètres de longueur au tuyau d'aspiration.

§ 352. Dans la *pompe foulante* (fig. 417), un piston plein A reçoit un mouvement de va-et-vient dans un corps de pompe qui plonge lui-même dans le réservoir où se trouve l'eau à élever. Une ouverture B, pratiquée au bas de ce corps de pompe, est munie d'une soupape qui s'ouvre de bas en haut : c'est par cette ouverture que l'eau du réservoir est puisée. Une seconde ouverture C fait communiquer le bas du corps de pompe avec un tuyau D par lequel l'eau doit être élevée ; cette ouverture est également munie d'une soupape, qui permet au liquide de passer du corps de pompe dans le

tuyau D, mais qui ne le laisse pas revenir du tuyau dans le corps de pompe.

Lorsque le piston A s'élève, il tend à faire un vide au-dessous de lui; la soupape C se ferme, la soupape B s'ouvre, au contraire, et le corps de pompe s'emplit d'eau. Le piston venant ensuite à descendre, la soupape B se ferme; l'eau contenue dans le corps de pompe est comprimée; elle ouvre la soupape C, et passe dans le tuyau d'ascension D.

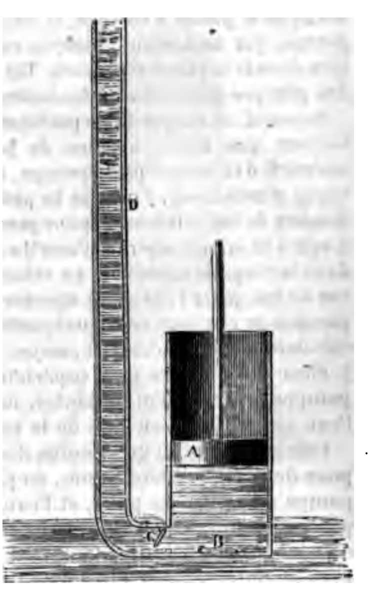


Fig. 417.

Quelque grande que soit la hauteur à laquelle s'élève le tuyau d'ascension d'une pompe foulante, l'eau pourra toujours y être conduite par la pompe, pourvu que l'on applique au piston une force suffisamment grande. C'est ce qui constitue une différence essentielle entre la pompe foulante et la pompe aspirante, puisque cette dernière pompe ne peut faire monter l'eau qu'à une hauteur qui ne dépasse pas une certaine limite.

La force qu'il faut appliquer au piston d'une pompe foulante, pour le faire monter dans le corps de pompe, est toujours petite en raison de ce que la pression qu'il éprouve de la part de l'eau sur sa face inférieure n'est jamais très-différente de la pression atmosphérique. Lorsque le piston descend, il a à vaincre la pression de l'eau, pression qui est déterminée par la hauteur à laquelle l'eau est élevée : cette pression est égale au poids d'un cylindre d'eau qui aurait pour base la surface du piston, et pour hauteur la distance verticale de la face inférieure de ce piston au point où l'eau est élevée par la pompe.

§ 353. La *pompe aspirante et foulante* réunit à elle seule les deux dispositions que présentent les pompes dont nous venons de parler. Concevons que, dans la pompe foulante (fig. 417), le corps de pompe ne soit pas placé au milieu du réservoir d'eau, mais

qu'il se trouve plus haut, et qu'il soit muni d'un tuyau d'aspiration, partant de l'ouverture B, et plongeant dans ce réservoir. Lorsque le piston s'élèvera, il fera monter l'eau dans le corps de pompe, par aspiration; lorsque ensuite il s'abaissera, il la refoulera dans le tuyau d'ascension. Tel est le principe de la disposition des pompes aspirantes et foulantes.

Souvent on adopte la disposition de la figure 416, avec cette différence que l'eau, au lieu de pouvoir s'écouler par un tuyau latéral E fixé au corps de pompe, est obligée de monter dans un tuyau d'ascension. Lorsque le piston s'abaisse, l'eau qui est au-dessous de lui le traverse, pour passer au-dessus. Lorsqu'il s'élève, il agit à la fois en aspirant l'eau du réservoir, pour la faire monter dans le corps de pompe, et en refoulant l'eau qui se trouve au-dessus de lui, pour l'obliger à monter dans le tuyau d'ascension. Les pompes de ce genre sont quelquefois appelées *pompes aspirantes et élévatoires*, ou simplement *pompes élévatoires*, parce que le piston y élève l'eau sur sa face supérieure. Mais ce sont de véritables pompes aspirantes et foulantes, dans lesquelles le piston refoule l'eau en montant, au lieu de la refouler en descendant.

Lorsqu'on établit une pompe destinée à élever l'eau d'un puits, pour des usages domestiques, on place ordinairement le corps de pompe à l'orifice du puits, et l'eau se trouve élevée uniquement par aspiration. Mais il faut pour cela que la profondeur du puits ne dépasse pas 8 mètres (§ 351). Lorsque la profondeur est plus grande, on est obligé d'installer le corps de pompe dans le puits, et d'employer en conséquence une pompe aspirante et foulante. Dans ce cas, on peut placer le corps de pompe à une hauteur plus ou moins grande au-dessus du fond du puits, pourvu que cette hauteur ne dépasse pas 8 mètres. On se détermine, dans le choix de la place qu'on doit donner au corps de pompe, par des raisons d'économie dans la construction, et de commodité pour l'installation et les réparations; quant au travail moteur qui devra être appliqué à la pompe, pour lui faire monter une quantité d'eau déterminée, on sait qu'il ne dépendra aucunement de la place qu'on assignera au corps de pompe dans le puits (§ 337).

§ 354. La figure 418 représente la disposition qui est le plus adoptée, pour les pompes destinées aux usages domestiques. Un levier ABC peut tourner autour d'un axe B. En élevant et abaissant successivement l'extrémité A, on donne au point C un mouvement de va-et-vient analogue, mais en sens contraire; lorsque l'extrémité A s'élève, le point C s'abaisse, et inversement. Une *bielle* CD est articulée d'une part à l'extrémité C du levier, d'une *autre* part en un point D de la tige du piston E; en sorte que le mou-

vement de va-et-vient du point C se transmet au piston, qui s'élève et s'abaisse ainsi successivement dans le corps de pompe. Lorsque le piston E s'élève, les deux soupapes F, G, s'ouvrent; d'un côté, l'eau du puits sur lequel la pompe est placée se trouve aspirée par le tuyau H, et monte dans le corps de pompe: l'eau, qui surmonte le piston, est refoulée d'un autre côté par le tuyau I, et monte jusqu'au point où ce tuyau aboutit. Lorsque le piston s'abaisse, les soupapes F, G, se ferment, celle du piston s'ouvre, et l'eau qui existe dans le corps de pompe, au-dessous du piston, traverse l'ouverture de cette soupape pour passer au-dessus. On voit que l'on n'a besoin d'appliquer une force au levier ABC, pour faire marcher l'eau, que lorsque le piston s'élève, et par conséquent lorsque l'extrémité A du levier s'abaisse. Cette force doit être capable de vaincre : 1° le poids d'une colonne d'eau ayant pour base la surface du piston, et pour hauteur la distance verticale du niveau de l'eau dans le puits à l'extrémité supérieure du tuyau d'ascension I, poids qui agit au point C du levier ABC; 2° les résistances passives occasionnées par le mouvement de l'eau et des parties solides de la pompe. Pour produire le mouvement descendant du piston, on n'a à vaincre que des résistances passives de peu d'importance.



Fig. 418.

Ordinairement un petit tuyau latéral, muni d'un robinet K, est adapté à la pompe, vers la partie supérieure du corps de pompe. Lorsqu'on ouvre le robinet K, l'eau s'écoule par ce tuyau latéral, sans s'élever dans le tuyau d'ascension I. La pompe devient alors une simple pompe aspirante.

§ 355. Dans les diverses espèces de pompes que nous venons d'indiquer, le mouvement de l'eau est intermittent, soit dans le tuyau d'aspiration, soit dans le tuyau d'ascension. L'eau ne monte dans chacun de ces tuyaux que lorsque le piston marche dans un sens, et elle s'arrête ensuite pendant qu'il marche en sens contraire, pour reprendre son mouvement lorsque le piston recommence à marcher dans le premier sens. C'est ainsi que dans la pompe foulante (fig. 417), l'eau ne se meut dans le tuyau d'ascension que lorsque le piston descend; elle y reste immobile quand il monte. De même, dans la pompe de la figure 418, l'eau ne marche dans le tuyau d'aspiration et dans le tuyau d'ascension que lorsque le piston s'élève; elle s'arrête dans ces tuyaux pendant qu'il s'abaisse. Ce mouvement intermittent de l'eau détermine une perte de travail, qui est due: 1° à ce que cette eau doit se mettre brusquement en mouvement après chaque temps de repos, ce qui équivaut à un choc; 2° à ce que la vitesse que possède l'eau dans les tuyaux est à chaque instant anéantie, sans produire d'effet, et qu'une certaine quantité de travail doit être employée pour donner cette vitesse à l'eau chaque fois qu'elle se remet en mouvement.

Pour faire disparaître ce mouvement intermittent de l'eau dans les tuyaux d'aspiration et d'ascension, on a imaginé la *pompe à double effet*, dans laquelle l'eau est aspirée et refoulée en même temps, soit que le piston descende, soit qu'il remonte. Un piston plein A (fig. 419) se meut dans un corps de pompe fermé à ses deux extrémités. Quatre ouvertures B, C, B′, C′, situées deux au bas et les deux autres au haut du corps de pompe, le font communiquer d'une part avec un tuyau d'aspiration D, et d'une autre part avec un tuyau d'ascension E; ces ouvertures sont munies toutes quatre de soupapes s'ouvrant dans le sens du mouvement que doit prendre l'eau pour passer, soit du tuyau d'aspiration dans le corps de pompe, soit du corps de pompe dans le tuyau d'ascension. Lorsque le piston A s'élève, les soupapes B′ et C sont fermées, et les autres B et C′ sont ouvertes; l'eau monte du tuyau D dans la partie inférieure du corps de pompe, et celle qui est au-dessus du piston est refoulée dans le tuyau E. Lorsque ensuite le piston s'abaisse, les soupapes B, C′ se ferment, et les autres B′, C s'ouvrent; l'eau du tuyau d'aspiration pénètre dans le corps de pompe par l'ouverture B′, et celle qui s'est introduite précédemment au-dessous du

piston est refoulée dans le tuyau d'ascension par l'ouverture C. On voit que, par là, l'eau est toujours en mouvement, soit dans le tuyau d'aspiration, soit dans le tuyau d'ascension.

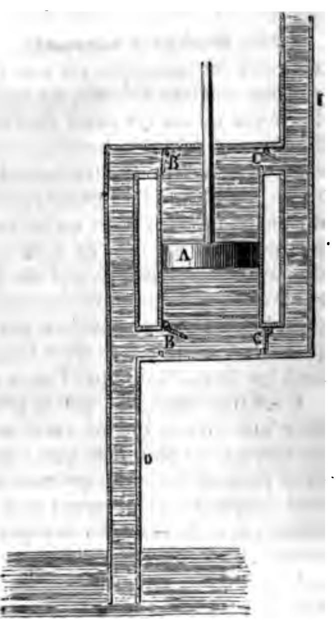


Fig. 419.

Une pompe à double effet, disposée comme nous venons de l'indiquer, fournira, à chaque coup de piston, deux fois autant d'eau qu'une pompe à simple effet qui aurait les mêmes dimensions. Mais il ne faut pas voir là un avantage de la pompe à double effet; car si elle produit un travail utile double de celui qu'aurait produit l'autre pompe, d'un autre côté elle exige une quantité double de travail moteur; sous ce point de vue, elle n'offre pas d'avantage sur une pompe à simple effet, dont le corps de pompe aurait une capacité deux fois plus grande. L'avantage de la pompe à double effet consiste uniquement dans la continuité qu'elle donne au mouvement de l'eau dans les tuyaux d'aspiration et d'ascension.

Une pompe à double effet présente une complication qui rend l'entretien du piston et des soupapes plus difficile que dans les pompes à simple effet. D'ailleurs on arrive tout aussi bien à donner un mouvement continu à l'eau dans les tuyaux, en accolant deux pompes à simple effet, qui communiquent à un même tuyau d'aspiration et à un même tuyau d'ascension, et dont les pistons marchent toujours en sens contraire l'un de l'autre; lorsque la première de ces deux pompes agit par aspiration, l'autre agit par refoulement, et inversement. Aussi emploie-t-on rarement la pompe à double effet, et la remplace-t-on par deux pompes à simple effet, agissant comme on vient de le dire, et mues par un même moteur. Souvent même, pour arriver à une plus grande régularité dans le mouvement de l'eau le long des tuyaux, on réunit trois et même quatre pompes à simple effet, dont les mou-

vements se contrarient, de manière à rendre sensiblement constante la quantité d'eau qui est aspirée et refoulée à chaque instant.

§ 356. **Pompe à incendie.** — La pompe dont on se sert pour éteindre les incendies est une pompe foulante. Son tuyau d'ascension est très-flexible, de manière à pouvoir être dirigé à volonté sur tel ou tel point de l'incendie, pendant que la pompe fonctionne : aussi la hauteur verticale à laquelle l'eau est élevée dans ce tuyau est-elle très-variable, et souvent même elle devient nulle, parce que l'on place l'orifice de sortie du tuyau au niveau du piston. Mais, l'objet qu'on se propose, en manœuvrant cette pompe, n'est pas tant de faire monter l'eau jusqu'à l'extrémité du tuyau d'ascension, que de lui donner une vitesse considérable à sa sortie de cette extrémité; on produit ainsi un jet d'une grande amplitude, que l'on peut diriger d'un peu loin sur les parties où l'on veut arrêter l'incendie. Nous allons voir quelles sont les dispositions que l'on a adoptées pour atteindre ce but.

Il est très-important que le jet qui s'échappe du tuyau en sorte avec une vitesse qui ne varie pas sensiblement d'un moment à un autre. C'est pour cela que l'on dispose, à côté l'une de l'autre, deux pompes foulantes qui marchent alternativement, et qui, par leur ensemble, remplacent une pompe à double effet (§ 355). Les pistons *a*, *a*, de ces deux pompes (fig. 420), se meuvent en même temps, mais en sens contraire; lorsque l'un d'eux descend, l'autre monte, et inversement. L'eau s'introduit dans chacun des deux corps de pompe par les soupapes *b*, *b*; et, lorsqu'elle est refoulée, elle ouvre les soupapes *c*, *c*, pour se rendre dans un petit réservoir placé au milieu, dans lequel plonge le tuyau d'ascension *d*.

Malgré l'emploi simultané de deux pompes foulantes aboutissant à un même tuyau d'ascension, la vitesse de l'eau serait encore loin d'être régulière à sa sortie de ce tuyau, si l'on n'avait pas recours à un autre moyen; le mouvement de l'eau se ralentirait d'une manière très-marquée, chaque fois que les pistons devraient changer le sens de leur mouvement. Ce moyen de régulariser la vitesse de l'eau consiste dans l'emploi d'un réservoir d'air *e*, placé au-dessus de la capacité où se rend l'eau qui vient des corps de pompe. L'air contenu dans ce réservoir est complétement renfermé; il se met en équilibre de pression avec l'eau qu'il surmonte, et sa force élastique est d'autant plus grande que le mouvement de l'eau dans le tuyau d'ascension exige une pression plus considérable à l'origine de ce tuyau *d*. Si, à certains moments, l'eau afflue par une des soupapes *c*, *c*

avec une grande abondance, elle n'a pas besoin de passer immédiatement dans le tuyau *d*; elle s'accumule dans le réservoir où plonge ce tuyau, en comprimant l'air qui le surmonte, puis,

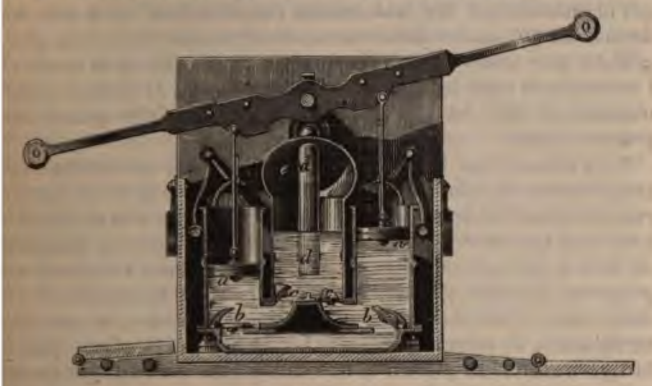


Fig. 420.

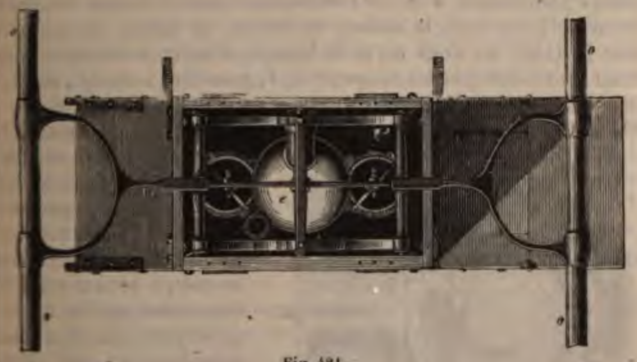


Fig. 421.

lorsqu'il arrive moins d'eau par les soupapes, cet air, en réagissant sur l'eau, la pousse peu à peu dans le tuyau d'ascension. A l'aide de cette disposition, les irrégularités que présente la quantité d'eau foulée à chaque instant à travers les soupapes *c*, *c*, se font principalement sentir dans le réservoir où aboutissent ces soupapes, et s'y traduisent par des oscillations de la surface de l'eau, qui monte et descend alternativement; mais il n'en résulte que des *variations très*-peu sensibles dans la vitesse

avec laquelle l'eau jaillit à l'extrémité du tuyau de la pompe.

Pour que l'eau n'ait pas, dans toute la longueur du tuyau, la vitesse avec laquelle elle doit s'en échapper à son extrémité, ce qui occasionnerait des frottements considérables, on a soin de donner au tuyau des dimensions transversales beaucoup plus grandes que celles de l'orifice qui le termine. De cette manière l'eau marche assez lentement le long du tuyau, et ce n'est qu'au moment où elle est sur le point de sortir qu'elle prend une grande vitesse.

Pour manœuvrer la pompe, on agit aux deux extrémités d'un grand levier ou balancier, qui peut osciller autour d'un axe horizontal placé au-dessus du réservoir d'air *e* (fig. 420 et 421). Ce balancier est traversé à chaque extrémité par un long morceau de bois *o*, qui sert de poignée. Plusieurs hommes saisissent ces poignées, les font alternativement monter et descendre, et ce mouvement d'oscillation est transmis aux pistons *a*, *a*, par l'intermédiaire de tringles de fer qui sont articulées, d'une part à la tige de chaque piston, d'une autre part en deux points du balancier situés de chaque côté de son axe. Pendant que la pompe fonctionne, d'autres hommes ont soin de verser constamment de l'eau dans la caisse, ou bâche, au milieu de laquelle sont installés les deux corps de pompe; c'est de cette bâche que l'eau s'introduit par les soupapes *b*, *b*, pour être ensuite refoulée dans le tuyau d'ascension.

§ 357. **Pompe à rotation** — On a cherché à remplacer le mouvement de va-et-vient qu'il faut donner au piston d'une pompe, par un mouvement de rotation s'effectuant toujours dans le même sens : voici la disposition qu'on a imaginée pour cela. Une pièce annulaire AA (fig. 422), reçoit un mouvement de rotation autour d'un axe qui correspond à son centre; elle tourne ainsi dans un espace également annulaire BB. Cet anneau AA présente quatre échancrures, qui sont traversées librement par autant de pièces C, C, destinées à diviser l'espace BB en compartiments qui n'aient entre eux aucune communication. Les contours extérieur et intérieur de l'espace BB,



Fig. 422.

dans lequel se meuvent l'anneau AA et les pièces C, C, qu'il entraîne avec lui, ne sont pas des circonférences de cercle ; ces deux contours, qui sont partout à égale distance l'un de l'autre, se rapprochent du centre de l'anneau AA, dans la partie qui est à droite, de telle sorte que le contour extérieur s'y trouve en contact avec la surface de cet anneau. Cette forme de l'espace BB oblige les pièces C, C à glisser dans les échancrures de l'anneau AA, de manière à se rapprocher et à s'éloigner alternativement de l'axe de rotation. Il en résulte que les compartiments qui existent tout autour de l'anneau AA, et qui sont séparés les uns des autres par les pièces C, C, n'ont pas toujours la même capacité; ces compartiments augmentent de grandeur, quand les pièces C, C, qui les terminent, s'éloignent du centre du mouvement, et diminuent au contraire de grandeur, quand ces pièces C, C se rapprochent de ce centre. Deux ouvertures sont pratiquées dans le contour extérieur de l'espace BB, et correspondent, l'une à un tuyau d'aspiration, l'autre à un tuyau d'ascension. Lorsque, pendant la rotation de l'anneau AA, l'un des compartiments qui l'entourent vient à augmenter de grandeur, ce compartiment communique avec le tuyau d'aspiration par la première de ces deux ouvertures; il aspire l'eau contenue dans ce tuyau, et se trouve ainsi complétement rempli de liquide au moment où il a atteint sa plus grande capacité. Lorsque ensuite ce compartiment vient à se rétrécir, il se trouve en rapport avec le tuyau d'ascension, par la seconde ouverture; l'eau qu'il contient est donc obligée de se rendre dans ce tuyau, à mesure que la capacité de ce compartiment devient plus petite. On voit par là que la pompe dont il s'agit est à la fois aspirante et foulante; et que, de plus, elle remplit l'objet d'une pompe à double effet, car le mouvement qu'elle donne à l'eau dans le tuyau d'aspiration et dans le tuyau d'ascension est évidemment continu.

§ 358. **Pompes de mines.** — L'épuisement des eaux des mines se fait, le plus habituellement, au moyen de pompes que l'on installe dans un puits aboutissant au point des galeries souterraines où se rendent les eaux à extraire. Les puits de ce genre ont souvent une grande profondeur : aussi est-on obligé de donner une disposition spéciale aux pompes qui doivent y fonctionner.

D'après ce que nous avons dit précédemment (§ 352), une pompe foulante pourrait bien faire monter l'eau dans un tuyau d'ascension qui s'élèverait dans toute la hauteur du puits; mais cela suppose que la pompe remplit des conditions de construction difficiles à obtenir, et que l'on n'a pu réaliser que depuis un petit nombre d'années. Pour que le piston puisse refouler

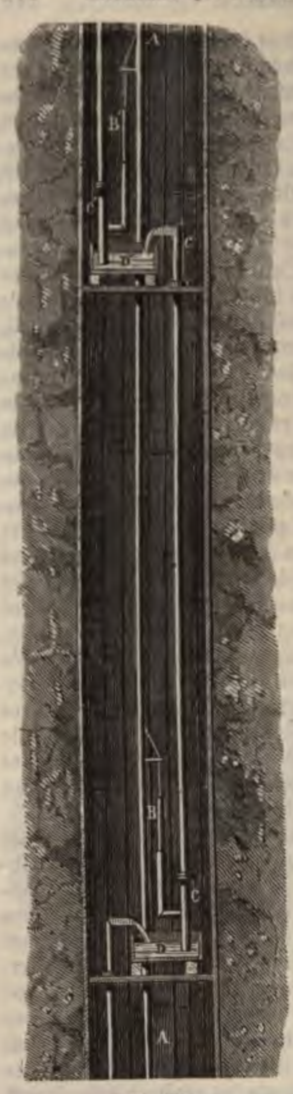


Fig. 423.

l'eau dans un tuyau d'ascension d'une grande hauteur, il faut que son contour s'applique assez exactement contre les parois du corps de pompe, pour s'opposer aux filtrations du liquide tout autour de ce piston, qui tendent à se produire sous la pression énorme déterminée par la colonne d'eau à soulever. La présence de pareilles filtrations pourrait faire que le mouvement du piston n'élevât pas la moindre quantité d'eau dans le tuyau d'ascension; mais, lors même qu'il y aurait de l'eau élevée, il n'en résulterait pas moins un grave inconvénient, en ce que la pompe exigerait l'emploi de la même quantité de travail que si elle fonctionnait bien, et qu'une portion notable de ce travail serait perdue. C'est pour ces motifs que l'on n'élève pas l'eau d'un seul jet, dans toute la hauteur du puits, au moyen d'une pompe foulante placée vers le bas.

La disposition qu'on a adoptée consiste à diviser le puits, dans toute sa hauteur, en étages superposés, et à établir à chaque étage une pompe destinée à élever l'eau à l'étage supérieur. Une même tige AA (fig. 423), qui s'étend du haut en bas du puits, et que l'on nomme la maîtresse tige, porte, de distance en distance, les pistons B, B', des diverses pompes; elle est animée d'un mouvement de va-et-vient qui lui est donné par une machine motrice placée à la surface du sol, dans le voisinage du puits, et elle fait ainsi fonctionner en même temps toutes les pompes qui sont installées dans toute la hauteur du puits.

Le piston B, dans son mouvement de va-et-vient, augmente et diminue alternativement la capacité d'un corps de pompe qui communique par un tuyau horizontal avec le bas du tuyau CC. Deux soupapes existent dans ce tuyau CC, l'une au-dessous, l'autre au-dessus de la communication avec le corps de pompe, et s'ouvrent toutes deux de bas en haut. Lorsque le piston B monte, la soupape supérieure se ferme, l'autre s'ouvre, et l'eau de la bâche D monte par aspiration dans le corps de pompe; lorsque ensuite le piston B redescend, la soupape inférieure se ferme, la soupape supérieure s'ouvre, et l'eau est refoulée dans le tuyau d'ascension CC. Cette eau se rend dans une bâche D′, où elle est puisée par le piston B′, et refoulée de la même manière dans un tuyau C′, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'elle arrive au haut du puits, où elle s'écoule au dehors.

§ 359. **Pompes de Marly.** — La fameuse machine de Marly, construite sous Louis XIV (de 1675 à 1682), avait pour objet d'élever l'eau de la Seine au haut d'un aqueduc, d'où elle se rendait dans des bassins destinés à alimenter le château et le parc de Marly. Plus tard cette eau fut conduite jusqu'à Versailles, pour l'usage du château et de la ville. La hauteur totale à laquelle l'eau devait être élevée par cette machine était de 155 mètres; aussi ne chercha-t-on pas à la faire monter, d'un seul jet, de la Seine au haut de l'aqueduc. On établit deux réservoirs intermédiaires, dont l'un était placé vers le milieu de la hauteur du coteau qui s'élève aux bords de la Seine, et l'autre vers le haut de ce coteau, à un certaine distance du pied de l'aqueduc. Trois systèmes de pompes furent installés, l'un au bord de la Seine, les deux autres à côté des deux réservoirs intermédiaires dont nous venons de parler. Le premier système de pompes élevait l'eau de la Seine dans le réservoir placé au milieu du coteau; le second reprenait cette eau pour l'élever dans le réservoir situé vers le bas de l'aqueduc; et le troisième la faisait monter de ce deuxième réservoir jusqu'au haut de l'aqueduc. Quatorze roues hydrauliques (le nombre de ces roues avait été déterminé, dit-on, de manière à rappeler le nom de Louis XIV) étaient établies dans la Seine et y étaient mises en mouvement par la chute d'eau qu'on y avait créée, en construisant un barrage et des digues latérales, de manière à élever le niveau de l'eau en amont. Ces quatorze roues, dont chacune avait 12 mètres de diamètre, faisaient mouvoir les trois systèmes de pompes. A cet effet, le mouvement était transmis aux pompes placées près des réservoirs intermédiaires, par un grand nombre de longues chaînes formées de barres de fer articulées les unes au bout des autres, qui s'étendaient sur le

flanc du coteau, moitié jusqu'au premier réservoir, et l'autre moitié jusqu'au second, c'est-à-dire jusqu'au sommet du coteau; le mouvement de va-et-vient, que des manivelles adaptées aux arbres des roues hydrauliques communiquaient à ces chaînes, donnait lieu à un mouvement correspondant des divers pistons, et l'eau était élevée par étages, comme dans les puits de mines, depuis la Seine jusqu'au haut de l'aqueduc.

Dans cette machine immense, la plus grande partie du travail moteur développé par la chute d'eau, et appliqué aux roues hydrauliques, était absorbée par les résistances passives; ces résistances n'ont fait que s'accroître avec le temps, et elle a fini par ne produire qu'une très-petite quantité de travail utile. Elle a été remplacée depuis par des pompes auxquelles on est parvenu à faire élever l'eau d'un seul jet, depuis le bord de la Seine jusqu'au sommet de l'aqueduc. La construction de ces nouvelles pompes, qui remonte à peine aux premières années de ce siècle, a fourni le premier exemple de l'élévation de l'eau, d'un seul jet, à une aussi grande hauteur. Voici quelle en était la disposition.

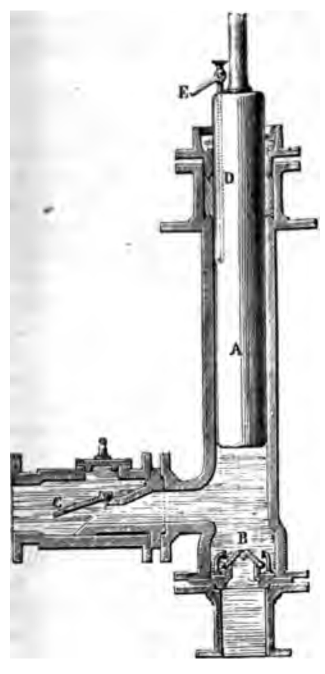


Fig. 424.

Un piston métallique A (fig. 424), a la forme d'un cylindre dont la hauteur est beaucoup plus grande que le diamètre; ce piston se meut dans un corps de pompe, dont il ne touche pas les parois, et ne frotte que sur une garniture d'étoupes qui est adaptée à la partie supérieure du corps de pompe. Deux soupapes à clapet B établissent et interceptent alternativement la communication du corps de pompe avec le tuyau d'aspiration; une autre soupape C le fait de même communiquer avec le tuyau d'ascension. Le mouvement de va-et-vient du piston donne lieu à une augmentation et à des diminutions alternatives

de la capacité du corps de pompe, tout aussi bien que si le piston était garni d'étoupes sur son contour, et frottait contre les parois intérieures du corps de pompe. Lorsqu'il s'élève, il y a aspiration de l'eau par les soupapes B ; lorsqu'il s'abaisse ensuite, cette eau est refoulée par la soupape C. La garniture d'étoupes, qui est ici adaptée au haut du corps de pompe, peut être plus facilement entretenue en bon état que si elle était portée par le piston et mobile avec lui ; mais cette disposition seule, en vertu de laquelle ce système de pompe prend le nom de *pompes à piston plongeur*, n'aurait pas suffi pour que l'eau pût être refoulée jusqu'à une hauteur verticale de 155 mètres.

Si l'on examine ce qui se passe pendant que la pompe fonctionne, on voit que la pression, dans le corps de pompe, doit être inférieure à la pression atmosphérique, lorsque l'aspiration se produit, et qu'au contraire, elle doit lui être de beaucoup supérieure, lorsque l'eau est refoulée dans le tuyau d'ascension. Dans le premier cas, l'eau, qui contient toujours une petite quantité d'air en dissolution, doit laisser dégager une partie de cet air ; d'ailleurs elle peut aussi amener avec elle de petites quantités d'air qui se trouvent entraînées mécaniquement, sans être dissoutes ; enfin il peut arriver que l'air atmosphérique s'infiltre, soit par quelques fissures, soit en passant entre le piston et la garniture d'étoupes. On voit donc que chaque aspiration peut amener de l'air dans le corps de pompe ; cet air se loge dans l'espace annulaire très-étroit qui existe entre le piston et le corps de pompe, et aussi au-dessous du piston. Lorsque le piston s'abaisse, l'air contenu dans le corps de pompe commence par se comprimer, et ce n'est que lorsque son volume s'est assez diminué pour que sa force élastique soit en rapport avec la pression que produit la colonne d'eau du tuyau d'ascension, que l'eau commence à être refoulée à travers la soupape C. On conçoit par là que, si l'eau doit être élevée à une très-grande hauteur, il peut arriver que le piston ne refoule aucune quantité d'eau dans le tuyau d'ascension. Ou bien encore, si la pompe commence à fonctionner, elle fera d'abord monter de plus en plus le niveau de l'eau dans le tuyau d'ascension : mais il pourra se faire que ce niveau ne s'élève pas au delà d'une certaine limite, située plus bas que le point où l'on veut amener l'eau. Lors même que l'eau pourrait être refoulée jusqu'à l'extrémité supérieure du tuyau d'ascension, la présence de l'air dans le corps de pompe serait encore très-nuisible, en ce que la quantité d'eau élevée à chaque coup de piston en serait très-notablement diminuée. Pour se mettre à l'abri de ces graves inconvénients, on a pratiqué dans

le corps du piston un petit conduit D, fermé à sa partie supérieure par un robinet, que l'on peut ouvrir au moyen d'une clef E. De temps en temps on ouvre ce robinet, au moment où le piston descend, et l'air qui se trouve comprimé tout autour du piston s'échappe par le conduit D.

Deux des quatorze roues de l'ancienne machine de Marly avaient été conservées. Chacune d'elles faisait mouvoir quatre pompes telles que celle qui vient d'être décrite. Le mouvement était transmis de la roue à ces quatre pompes de manière que le refoulement de l'eau dans le tuyau d'ascension unique, auquel elles correspondaient, fût aussi régulier que possible. Lorsque l'un des quatre pistons était au haut de sa course, un second était au bas de la sienne, un troisième était au milieu de sa course ascendante, et le quatrième était au milieu de sa course descendante. Tout récemment de nouvelles roues plus puissantes ont été substituées aux anciennes; ces roues font mouvoir des pompes horizontales analogues à celles qui viennent d'être décrites.

La colonne d'eau contenue dans les tuyaux d'ascension des pompes de Marly produirait, à l'état d'équilibre, une pression de 15 atmosphères. L'expérience a prouvé que la pression que les pistons ont à vaincre s'élève environ à 17 atmosphères : les résistances qui résultent du mouvement de l'eau dans les tuyaux déterminent donc une augmentation de 2 atmosphères dans cette pression.

§ 360. **Pompe à force centrifuge.** — On a vu fonctionner aux expositions universelles de Londres (en 1851) et de Paris (en 1855) une machine servant à l'élévation de l'eau, et désignée sous le nom de *Pompe à force centrifuge*. Cette machine, inventée par l'Anglais Appold, ne rentre pas dans les pompes proprement dites, telles que nous les avons caractérisées dans le § 348. Voici en quoi elle consiste :

L'organe principal de la machine est une espèce de roue AA (fig. 425), montée sur un arbre horizontal B auquel on donne un mouvement de rotation très-rapide à l'aide d'une courroie sans fin passant sur le tambour C. La figure 426 en est une coupe faite perpendiculairement à l'axe, et à une plus grande échelle. Cette roue se compose essentiellement de six cloisons courbes s'étendant, parallèlement à l'axe, d'une des faces de la roue à l'autre face, et disposées régulièrement tout autour de l'axe. Chacune des deux faces de la roue est formée d'un disque qui présente en son milieu une large ouverture circulaire. Enfin une cloison plane placée perpendiculairement à l'axe, et au milieu de l'épaisseur de la roue, la divise en deux parties symétriques l'une

ıtre. On fait tourner la roue dans un sens tel que chaque ı courbe marche du côté vers lequel elle présente sa con-

x tuyaux D, D, communiquant avec le réservoir des eaux er, viennent aboutir de part et d'autre aux deux ouvertures

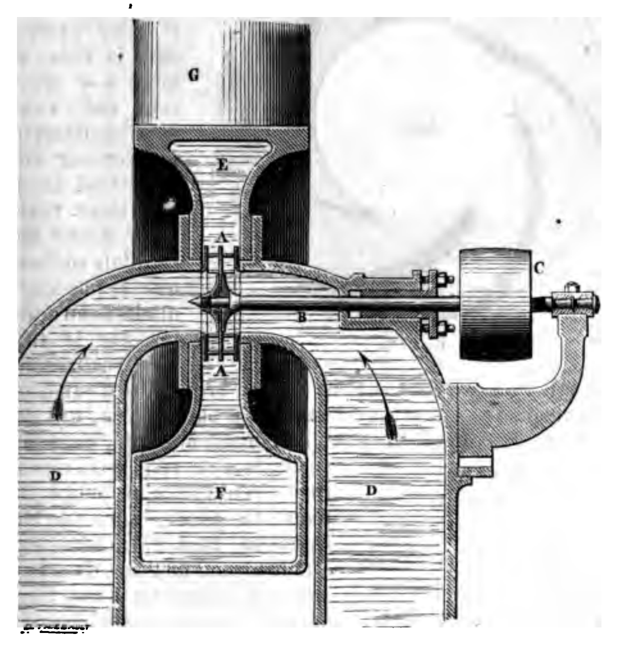


Fig. 425.

aires des faces de la roue AA. Autour de la roue existe un ; EF avec lequel elle communique librement par tout son ır; cet espace vient aboutir en F à la partie inférieure d'un vertical G qui passe en arrière de la machine, et par le- es eaux doivent être élevées.

ıque la roue AA tourne, l'eau comprise entre ses cloisons es participe nécessairement à son mouvement de rotation; 'ésulte une force centrifuge en vertu de laquelle cette eau ı quitter la roue pour se rendre dans l'espace environnant lle s'y rend en effet et oblige ainsi une portion de l'eau que mait précédemment cet espace à passer dans le tuyau d'as-

cension G. En même temps il se produit vers le centre des deux faces latérales de la roue une aspiration en vertu de laquelle l'eau du réservoir inférieur monte par les tuyaux D pour s'introduire dans la roue, de manière à y remplacer celle qui s'échappe continuellement par son contour en vertu de l'action de la force centrifuge. Cette machine donne de bons résultats surtout lorsque la hauteur à laquelle l'eau doit monter par le tuyau G n'est pas très-grande.

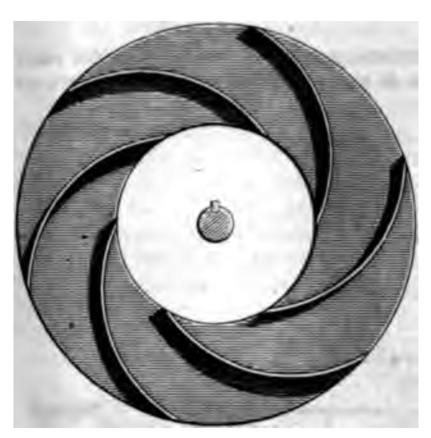


Fig. 426.

§361. **Pouce d'eau.**— Pour évaluer la quantité d'eau que fournit une pompe, on se sert d'une unité particulière, qui porte le nom de *pouce d'eau*. Imaginons qu'on ait pratiqué, dans la paroi verticale d'un réservoir, une ouverture circulaire d'un pouce de diamètre (le pouce, ancienne mesure française, vaut 27 millimètres), et que le niveau de l'eau, dans le réservoir, soit entretenu à une ligne audessus de la partie supérieure de cet orifice (la ligne est la douzième partie du pouce). C'est ce que représente la figure 427, qui a été construite à l'échelle de $0^m,5$ pour mètre. Si une pompe fournit, dans un temps donné, la quantité d'eau qui s'écoulerait dans le même temps par un, deux, trois... orifices de ce genre, placés dans les conditions indiquées, on dit qu'elle donne un, deux, trois,..... pouces d'eau. Le pouce d'eau ne représente pas un volume déterminé de liquide, et c'est pour cela qu'il peut servir de mesure à la puissance d'une pompe, sans qu'on ait besoin d'indiquer le temps pendant lequel on suppose qu'elle fonctionne. Si, au contraire, on voulait faire connaître la

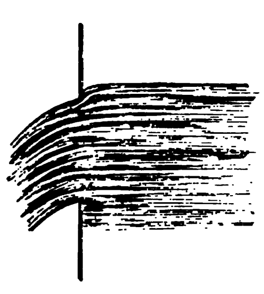


Fig. 427.

puissance d'une pompe, en indiquant le volume de l'eau qu'elle fournit, volume qui pourrait être évalué, soit en mètres cubes, soit en litres, on aurait besoin de dire, en outre, pendant combien de temps la pompe doit fonctionner pour fournir ce volume d'eau. L'expérience a montré que le volume de l'eau qui s'écoule en 24 heures, par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, percé en mince paroi, sous une charge d'une ligne au-dessus de la partie supérieure de cet orifice, est d'environ 19^{mc},2. On voit, d'après cela, que quand on dit qu'une pompe donne un, deux, trois,... pouces d'eau, cela signifie qu'elle fournirait en 24 heures une fois, deux fois, trois fois,... 19^{mc},2 d'eau.

Prony a indiqué une autre disposition, un peu plus commode que la précédente, pour l'orifice à l'aide duquel on peut évaluer le produit d'une pompe. C'est un orifice circulaire de 2 centimètres de diamètre, muni d'un ajutage cylindrique de 17 millimètres de longueur; le niveau de l'eau dans le réservoir doit être maintenu à une distance de 3 centimètres au-dessus de la partie supérieure de l'orifice. La figure 428, qui représente cette disposition, a été construite à l'échelle de 0^{m},5 pour mètre. On y voit un repère *a*, fixé à la paroi, et destiné à marquer la position que doit avoir le niveau de l'eau dans le réservoir. La quantité d'eau qui s'écoule en 24 heures, par cet orifice de Prony, est un peu plus grande que celle qui s'écoule par l'orifice de la figure 427; elle s'élève à 20 mètres cubes. On a conservé le nom de pouce d'eau au produit de cet orifice de Prony, en sorte que le pouce d'eau actuel est un peu plus grand que l'ancien pouce d'eau des fontainiers.

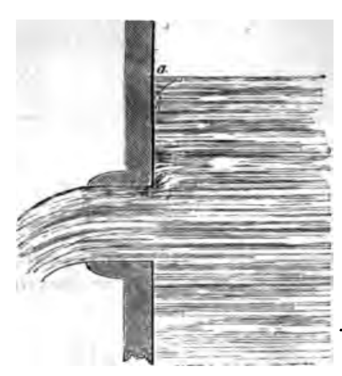


Fig. 428.

§ 362. **Cuvettes de jauge et de distribution.** — Il nous reste maintenant à dire par quel moyen on trouve le nombre de pouces d'eau que fournit une pompe. Pour cela il nous suffira de décrire la cuvette de jauge qui a été établie au haut de l'aqueduc de Marly, et qui était destinée à évaluer le produit des diverses pompes qui élèvent les eaux de la Seine jusque sur cet aqueduc.

La figure 429 représente le plan de cette cuvette de jauge; la

figure 430 en est une coupe faite suivant la ligne GG' du plan. L'eau élevée par les pompes arrive en A, où elle tombe sous forme de

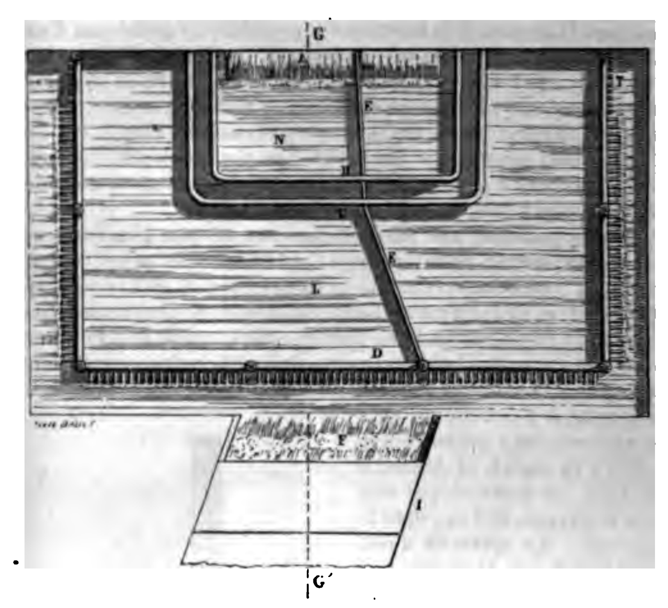


Fig. 429. (*Échelle de 20 millimètres pour mètre.*)

nappe, dans un réservoir rectangulaire. Deux cloisons B, C, enveloppent la partie N de ce réservoir, sans descendre jusqu'au fond

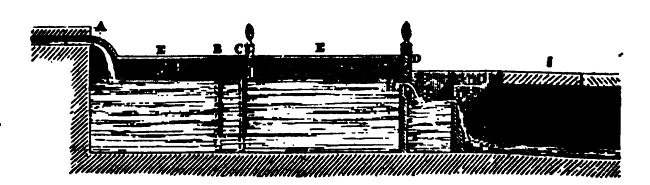


Fig. 430.

(fig. 430), afin d'empêcher que les mouvements occasionnés sur la surface, par l'eau qui arrive en A, ne se transmettent dans la partie restante L ; l'eau se rend de N en L en passant sous ces deux cloi-

s, et sa surface libre, dans toute l'étendue de cette dernière tie L du réservoir, est ainsi rendue parfaitement tranquille. La son D, qui sert de limite au réservoir, et qui s'étend dans trois ections différentes, porte, dans toute sa longueur, un grand nbre d'orifices H disposés comme celui de la figure 428; l'eau du réservoir par ces divers orifices, et tombe dans une rigole existe en dehors de la cloison D, et dans toute sa longueur; de lle tombe, en F, dans un canal couvert qui la conduit à l'autre rémité de l'aqueduc. Une cloison EE divise le réservoir LN en ux parties entièrement distinctes; celle de droite reçoit les eaux viennent des pompes mues par les roues hydrauliques; celle gauche reçoit les eaux fournies par les pompes d'une machine apeur établie, en 1826, dans le voisinage des roues. Par cette position, les eaux qui viennent de ces deux systèmes de pom- s ne se réunissent qu'après avoir traversé les orifices de la ison D, c'est-à-dire après avoir été jaugées, ainsi que nous ons l'expliquer.

Si l'on suppose que l'eau sorte du réservoir LN, en passant tou- urs par le même nombre de trous de la cloison D, on conçoit que niveau qu'elle prendra dans le réservoir sera plus ou moins evé au-dessus de ces trous suivant que les pompes fourniront lus ou moins d'eau dans un même temps. En effet ce niveau établit de manière à donner au liquide une vitesse d'écoule- ent, par les orifices, qui soit telle que la quantité d'eau qui s traverse, dans un temps donné, soit précisément égale à celle ue les pompes amènent dans le même temps. Si, au contraire, n ferme un certain nombre des orifices de la cloison D, à l'aide e bouchons de liége, comme on le voit en T (fig. 429), on fera monter en conséquence le niveau de l'eau dans le réservoir LN, our une même quantité d'eau fournie par les pompes; car, à mesure qu'on diminuera le nombre des orifices d'écoulement, vitesse avec laquelle l'eau traversera chacun d'eux devra s'ac- roître, pour qu'il en sorte toujours la même quantité. On peut onc faire varier à volonté la position du niveau de l'eau dans réservoir LN, en fermant un nombre plus ou moins grand des rifices; et l'on en profite pour faire en sorte que ce niveau coïn- ide avec un repère fixé à la cloison D, repère que nous avons éjà indiqué précédemment en *a* (fig. 428). Lorsque cette coïnci- ence du niveau de l'eau avec le repère est établie d'une manière ermanente depuis quelque temps, il suffit de compter les trous ui restent ouverts, pour avoir immédiatement le nombre de ouces d'eau que fournissent les pompes.

Dans la cuvette de jauge de l'aqueduc de Marly, la partie du

réservoir qui servait à jauger les eaux amenées par les roues hydrauliques était munie de 60 orifices; la partie correspondante aux eaux fournies par la machine à vapeur en contenait 90. Si l'on trouvait, par exemple, que les pompes mues par les roues hydrauliques élevaient 60 pouces d'eau sur l'aqueduc, ce qui devait avoir lieu lorsqu'elles fonctionnaient bien, cela voulait dire qu'elles élevaient 60 fois 20 mètres cubes, ou 1 200 mètres cubes d'eau, en 24 heures. On calculera sans difficulté le nombre de chevaux-vapeur qui correspond à ce travail utile, en observant que la hauteur à laquelle l'eau est élevée est de 155m. En effet, le travail utile, produit en 24 heures, sera égal à 186 000 000km; en une seconde, il sera 2 153km; donc il correspond à une force de 28 chevaux-vapeur. La force réunie des deux roues hydrauliques qui faisaient marcher les pompes à Marly, doit représenter un plus grand nombre de chevaux-vapeur, en raison des pertes de travail de toute sorte qui existent dans de semblables machines et qu'il est impossible de faire disparaître complétement.

La distribution des eaux entre les divers quartiers d'une ville et même entre les divers particuliers qui ont des concessions d'eau, se fait à l'aide de cuvettes entièrement analogues aux cuvettes de jauge. Toute la masse d'eau à distribuer se rend dans un réservoir, d'où elle sort par des orifices pratiqués sur tout son contour, et l'on dispose les tuyaux ou conduits entre lesquels doit se fractionner cette masse d'eau, de manière que chacun d'eux reçoive l'eau qui s'écoule par un nombre déterminé des orifices.

§ 363. **Divers systèmes de lampes.** — On a imaginé un grand nombre de dispositions différentes pour les appareils d'éclairage auxquels on donne le nom de *lampes*. Nous allons faire connaître les principales : on y verra une application d'un assez grand nombre des principes que nous avons étudiés jusqu'à présent.

Dans les lampes, la lumière est produite par la combustion de l'huile. Pour opérer cette combustion, on emploie une mèche de coton, que l'on fait plonger en grande partie dans l'huile; la portion de la mèche qui sort du liquide s'en imbibe complétement par un effet de capillarité, et c'est à cette portion que l'on met le feu. A mesure que l'huile se brûle, la capillarité en fait monter de nouvelles quantités, et la mèche ne se charbonne que dans une très-petite étendue. Pour activer la combustion et obtenir une lumière plus vive, on donne à la mèche la forme d'un cylindre creux, et on l'introduit dans l'espace annulaire compris entre deux tuyaux concentriques de fer-blanc; l'huile est amenée dans

ce même espace annulaire, et s'y élève jusqu'à la partie supérieure de ces deux tuyaux : la mèche, qui plonge ainsi dans l'huile, monte un peu plus haut, et lorsqu'on y met le feu, elle brûle sur tout le contour de son bord supérieur. On dispose en outre, autour du *bec* de la lampe, un tuyau de verre qui s'élève à 2 ou 3 décimètres au-dessus du point où se fait la combustion; ce tuyau fait fonction de cheminée d'appel, et, en raison de la température élevée qui s'y développe, il se produit à son intérieur un courant ascendant très-rapide qui amène constamment de l'air sur la flamme, tant par l'intérieur du bec, qui est creux, que par tout son contour. Ordinairement la cheminée de verre que l'on adapte à un bec de lampe se rétrécit brusquement à une faible distance de sa base; ce rétrécissement est destiné à changer la direction des divers filets gazeux, qui sans cela se mouvraient verticalement, et à les projeter sur le contour extérieur de la flamme.

La disposition qui vient d'être indiquée est adoptée dans toutes les lampes qui sont destinées à produire une lumière un peu vive. La différence entre les diverses espèces de lampes consiste essentiellement dans le moyen employé pour amener l'huile jusqu'à la partie supérieure du bec ; la variété des procédés imaginés pour y arriver tient à la difficulté qu'on a rencontrée pour remplir cet objet d'une manière convenable. Il faut, en effet, satisfaire aux conditions suivantes : 1° entretenir constamment l'huile dans le bec, au niveau de son extrémité supérieure ; 2° éviter que l'huile, en débordant tout autour du bec, ne puisse se répandre au dehors et salir les objets qu'elle atteindrait ; 3° faire en sorte que la lumière puisse se répandre dans toutes les directions possibles autour du bec, et éviter en conséquence les dispositions dans lesquelles certaines parties de la lampe pourraient intercepter la lumière, et projeter de l'ombre sur les corps environnants. Nous allons voir comment on est parvenu à satisfaire plus ou moins complétement à ces diverses conditions.

§ 364. La figure 431 représente une lampe dans laquelle le niveau de l'huile s'établit dans le bec, en vertu du principe de l'équilibre des liquides dans des vases communiquants (§ 228). L'huile est contenue dans un réservoir *aa*, en forme de couronne; deux conduits inclinés *b*, *b* l'amènent à la partie inférieure du bec, qui est disposé de manière à occuper le centre du réservoir. On voit en *c* une ouverture, habituellement fermée par un bouchon, qui sert à l'introduction de l'huile dans le réservoir. Un petit cône *d*, présentant un trou à son sommet, permet à l'air atmosphérique d'exercer librement sa pression sur le liquide. D'après cette disposi-

tion, le niveau de l'huile dans le bec est toujours à la même hauteur que dans le réservoir *aa*; il baisse donc de plus en plus, à mesure que l'huile se brûle. C'est pour cela qu'on a donné au réservoir de très-petites dimensions dans le sens vertical, et qu'on l'a surtout étendu dans le sens horizontal. Il en résulte que le niveau ne varie réellement pas d'une grande quantité dans le bec. Lorsque le réservoir est plein, le liquide doit monter jusqu'à la partie supérieure du bec ; il baisse à mesure que le réservoir se vide : mais le contact du métal empêche que la flamme ne descende en même temps le long de la mèche, et par suite l'intensité de la lumière produite doit diminuer progressivement.

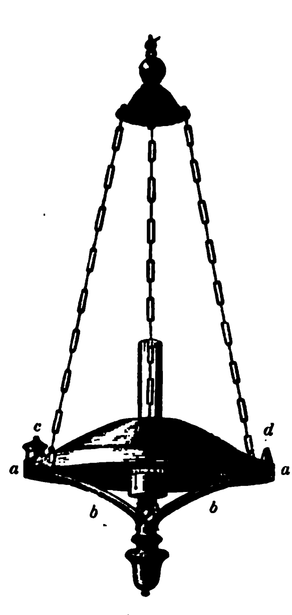


Fig. 431.

Un godet est adapté à la partie inférieure du bec, pour recevoir les petites quantités d'huile qui peuvent s'écouler au dehors. Plusieurs trous sont pratiqués au haut de ce godet, sur tout son contour, pour que l'air puisse s'introduire à l'intérieur, de manière à monter dans le bec, et à venir passer au milieu de la flamme. La forme du réservoir *aa*, et sa position par rapport au bec, font qu'il n'empêche nullement la lumière de se répandre librement sur les objets qui sont placés au-dessous du niveau de la lampe. Les conduits *b*, *b* peuvent seuls gêner sous ce rapport; mais ils sont très-étroits, et il n'en résulte pas d'inconvénient. Cette espèce de lampe, quant à sa disposition, convient donc très-bien pour éclairer des tables de travail, et en général dans tous les cas où l'on a besoin de répandre la lumière sur les objets placés dans la partie inférieure d'une chambre; mais elle a le désavantage de ne pas fournir une lumière d'une intensité constante.

§ 365. On a cherché à faire disparaître l'inconvénient qui résulte d'un abaissement progressif du niveau de l'huile dans le bec, en employant le moyen indiqué précédemment (§ 255), pour rendre

veau constant. La figure 432 représente une lampe cons- d'après cette idée. Un , qui a la forme d'un à une tubulure, est à l'intérieur d'un autre , cylindrique comme mier, mais ouvert par ut. Le vase *a* est ren- , c'est-à-dire que son ture est tournée vers le l s'appuie d'ailleurs, au n d'un bourrelet dont muni, sur tout le con- du bord supérieur du *b*. L'huile, que l'on a luite primitivement en peut pas en sortir li- ent, parce que l'espace au-dessus de sa surface ne communique pas l'atmosphère; elle ne s'écouler dans le réser- qu'autant que le ni- s'est assez abaissé dans servoir, pour permettre bulle d'air d'entrer par ulure du vase *a*. On voit le cette manière, on ob- un niveau constant de e à l'intérieur du réser- . Une petite ouverture le *c* pratiquée dans la paroi de ce réservoir, permet d'ail- à l'air extérieur d'y entrer librement ; en sorte que la sur- le l'huile *b* est soumise à la pression atmosphérique. Un *d* amène l'huile du réservoir *b* au bec, dont l'extrémité se e sur le plan horizontal *ee'* passant par les bords de la tubu- du vase *a*.

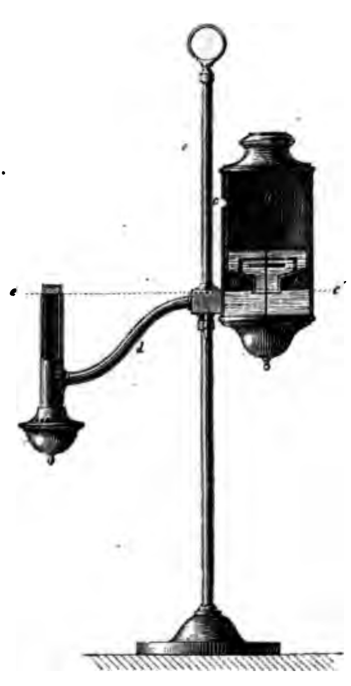


Fig. 432.

ır introduire de l'huile dans le vase *a*, on le retire de l'in- ır du réservoir *b*, et on le retourne afin de placer la tubu- ers le haut ; on l'emplit alors d'huile, puis on le renverse uveau, pour le replacer comme il était. Un petit disque llique, faisant fonction de soupape, vient s'appliquer contre erture intérieure de la tubulure, pour empêcher l'huile de

sortir, soit lorsqu'on enlève le vase *a* pour le remplir, soit lorsqu'on le remet en place après l'avoir empli. Cette soupape est munie d'une tige un peu longue, qui vient s'appuyer sur le fond du réservoir *b*, lorsque le vase *a* y est introduit, de manière à maintenir la tubulure constamment ouverte, et à permettre à l'huile de descendre librement en *b*, chaque fois que le niveau s'est suffisamment abaissé. La lampe est montée sur une tige, le long de laquelle on peut la faire glisser, pour la fixer à telle hauteur que l'on veut: la tige surmonte un large pied, à l'aide duquel on peut poser la lampe sur une table.

Cette lampe satisfait bien à la condition d'entretenir l'huile constamment à la même hauteur dans le bec, et par conséquent de donner une lumière d'une grande régularité; mais elle présente deux inconvénients. Le premier consiste en ce que le réservoir d'huile, placé d'un côté du bec, projette son ombre sur les objets situés de ce côté. Le second tient à ce que, la lampe étant portative, l'horizontalité de la ligne *e'* n'est pas toujours maintenue; pour peu que la lampe penche du côté du bec, soit qu'on la transporte, soit qu'elle repose sur une surface légèrement inclinée, l'huile déborde au haut du bec, vient remplir le godet qui est placé au-dessous, et finit par se répandre au dehors.

§ 366. La disposition la plus avantageuse qu'on puisse donner à une lampe est évidemment celle dans laquelle le bec serait placé verticalement au-dessus du réservoir, et à telle hauteur qu'on voudrait. En effet, on éviterait par là d'avoir latéralement des corps qui s'opposent à ce que la lumière se répande dans toutes les directions; et, d'un autre côté, l'huile qui déborderait tout autour du bec pourrait retomber dans le réservoir, ou bien encore dans une capacité spéciale assez grande pour qu'il n'y ait pas à craindre qu'elle se répande au dehors. Toute la difficulté que l'on rencontrera pour réaliser cette disposition, consistera à faire monter l'huile du réservoir jusqu'au haut du bec, et surtout à l'y faire monter d'une manière régulière. Nous allons voir quels sont les moyens qui ont été imaginés pour y arriver.

La fontaine de Héron, dont nous avons parlé précédemment (§ 294), paraît éminemment propre à atteindre le but que nous nous proposons en ce moment; on voit, en effet, qu'elle permettrait de faire monter de l'huile dans un bec qui serait isolé au-dessus du corps de la lampe. Mais si l'on examine attentivement cet appareil, on verra qu'il serait loin de satisfaire aux conditions que doit remplir une bonne lampe. Pour nous en rendre compte, admettons qu'une lampe soit disposée comme le tube ABC de

la figure 379 (page 437), et que le bec, dans lequel l'huile du réservoir C sera poussée par la colonne d'huile AB, soit assez élevé pour que le liquide s'y mette en équilibre, sans s'écouler par son extrémité supérieure. A mesure que l'huile brûlera vers le haut du bec, les surfaces libres du liquide A, B, C, se déplaceront ; le niveau baissera en A et en C, et montera au contraire en B. Pour que l'huile se maintînt toujours à la même hauteur dans le bec, il faudrait que la force élastique de l'air contenu de B en C augmentât, puisque la différence de niveau de l'extrémité supérieure du bec et de la surface du liquide en C augmente constamment. Or, cela ne peut pas avoir lieu, puisque cette force élastique de l'air est déterminée par la pression d'une colonne d'huile ayant pour hauteur la différence de niveau en A et en B, et que cette différence de niveau va en diminuant. On voit donc que la hauteur à laquelle l'huile s'élèvera dans le bec sera de plus en plus petite, à mesure qu'il s'en brûlera une plus grande quantité, et que, par suite, la quantité de lumière qu'elle fournira sera loin d'être régulière.

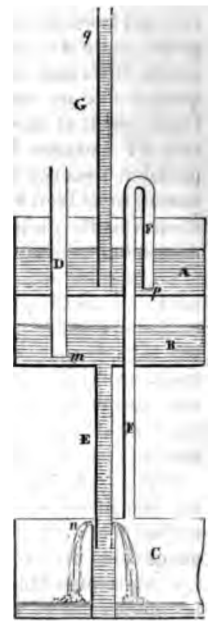


Fig. 433.

Mais, si la fontaine de Héron, telle que nous l'avons décrite, ne peut pas atteindre le but que l'on se propose, il suffit de lui faire subir quelques modifications, pour qu'elle puisse faire monter l'huile toujours à une même hauteur dans un bec de lampe. C'est ce que montre la figure 433. Trois compartiments A, B, C sont fermés de toutes parts, et ne peuvent communiquer, soit entre eux, soit avec l'atmosphère, que par les divers tubes D, E, F, G. Supposons que l'on ait primitivement introduit de l'huile en A et en B, par un moyen quelconque. La pression atmosphérique s'exerce librement sur l'huile de la capacité B par le tube D ; cette huile descend par le tube E, dans la capacité C ; l'air situé en C, au-dessus de l'huile, se trouve comprimé, et vient, en passant par le tube FF, exercer une pression sur l'huile du réservoir A ; enfin cette huile, en raison de cette pression qu'elle supporte, s'élève dans le tube G, qui communique librement avec l'at-

mosphère par sa partie supérieure. Si le tube G se termine par un bec de lampe, et que l'huile qui y arrive se brûle peu à peu, on voit que le niveau du liquide baissera en A et en B, et montera en même temps en C ; il semble donc que, la différence de niveau en B et en C diminuant, la force élastique de l'air intérieur doit diminuer, et qu'en conséquence, comme dans l'appareil de la figure 379, le liquide doit monter de moins en moins haut dans le tube G. Mais il faut observer que ce n'est pas sur la surface libre de l'huile en B que s'exerce la pression atmosphérique ; cette pression s'exerce à l'extrémité inférieure *m* du tube D. De même, en raison de ce que le tube E plonge dans un tube plus large placé au milieu du réservoir C, et que ce tube plus large est toujours plein d'huile jusqu'en *n*, la position du niveau de l'huile en C n'influe pas sur la force élastique de l'air qui la surmonte. Cette force élastique doit évidemment surpasser celle de l'air atmosphérique d'une quantité déterminée par la différence de niveau des deux points *m* et *n*, et en conséquence elle ne varie pas avec la position des surfaces libres de l'huile en B et en C. L'air qui se rend dans le réservoir A par le tube FF y exerce donc une pression constante ; et, comme cette pression s'exerce non pas sur la surface de l'huile qui y est contenue, mais bien à l'extrémité inférieure *p* du tube recourbé FF, il en résulte qu'elle fera toujours monter l'huile en *q*, à une même hauteur au-dessus du point *p*.

Ces ingénieuses modifications, apportées à la fontaine de Héron pour la rendre applicable à la construction des lampes, ont été imaginées par Girard. Les lampes construites d'après ce procédé ont reçu le nom de *lampes hydrostatiques*. Sous le point de vue théorique, elles satisfont à toutes les conditions que doit remplir une bonne lampe ; mais on les a abandonnées, à cause du peu de commodité qu'elles présentent sous le rapport de l'introduction de l'huile et des nettoyages.

§ 367. Pour faire monter l'huile d'une manière régulière dans un bec placé au-dessus du réservoir, on emploie maintenant exclusivement un moteur installé dans le corps de la lampe, soit au-dessous du réservoir d'huile, soit dans le réservoir lui-même. Les premières lampes de ce genre qui aient été construites sont les *lampes Carcel*, ainsi appelées du nom de leur inventeur. Dans ces lampes, un mécanisme d'horlogerie, mû par un ressort tel que ceux des figures 233 et 234 (page 243), et dont le mouvement est régularisé par l'appareil à palettes de la figure 236 (page 246), fait mouvoir des pompes foulantes qui élèvent l'huile jusqu'à la partie supérieure du bec. Ces pompes sont d'une espèce

lière. Deux compartiments rectangulaires A, B (fig. 434), : aucune communication l'un avec l'autre forment, à pro- ıt parler, les corps de pompe. Deux ouvertures circulaires, ont pratiquées sur l'une des faces de ces compartiments, exactement fermées par deux membranes non tendues, ıvent en conséquence être repoussées vers l'intérieur de npartiments, ou bien tirées au dehors. De petits disques ques, attachés à ces membranes, sont munis de tiges ; un levier EF. qui peut tourner autour d'un axe ver- est articulé à ses deux ités avec les tiges de ces de pistons ; un levier é au même axe G, est ι communication avec ıanivelle I, adaptée à nité d'un arbre hori- (, auquel le mécanisme gerie donne un mouve- e rotation uniforme. La lle I pousse et tire al- /ement le levier GH, par oédiaire de la bielle HI ; . prenant ainsi un mou- . de rotation alternatif, communique un mouvement de ient aux deux tiges CE, DF ; et les membranes C et D sont ›s à l'intérieur des compartiments A et B, et retirées au La capacité de chacun de ces compartiments A, B, aug- donc et diminue alternativement, tout aussi bien que si on était animé d'un mouvement de va-et-vient à son in- , en frottant contre ces parois. Une soupape permet à du réservoir de pénétrer dans chacun des corps de lorsque sa capacité augmente ; lorsque, au contraire, sa é diminue, cette soupape se ferme, et l'huile, ouvrant tre soupape, est refoulée dans un tuyau d'ascension. Le nent ascendant de l'huile est sensiblement régulier, en le ce qu'il existe deux pompes qui marchent en sens con- 'une de l'autre, ce qui fait que l'huile est toujours re- soit par l'une, soit par l'autre, dans le tuyau d'ascension n auquel elles communiquent.

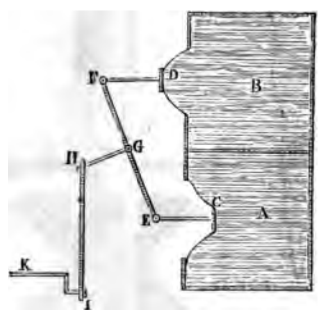


Fig. 434.

les lampes Carcel, les pompes sont disposées de manière nonter plus d'huile qu'il n'en faut pour entretenir la com- ; l'excédant retombe dans le réservoir même où puisent ıpes.

§ 368. Depuis quelques années, on se sert beaucoup des lampes dites *à modérateur*, dont l'invention est due à M. Franchot. Dans ces lampes, l'huile est refoulée jusqu'au bec par l'action d'un ressort moteur, comme dans les lampes Carcel ; mais leur prix est beaucoup moins élevé en raison de la plus grande simplicité de leur construction.

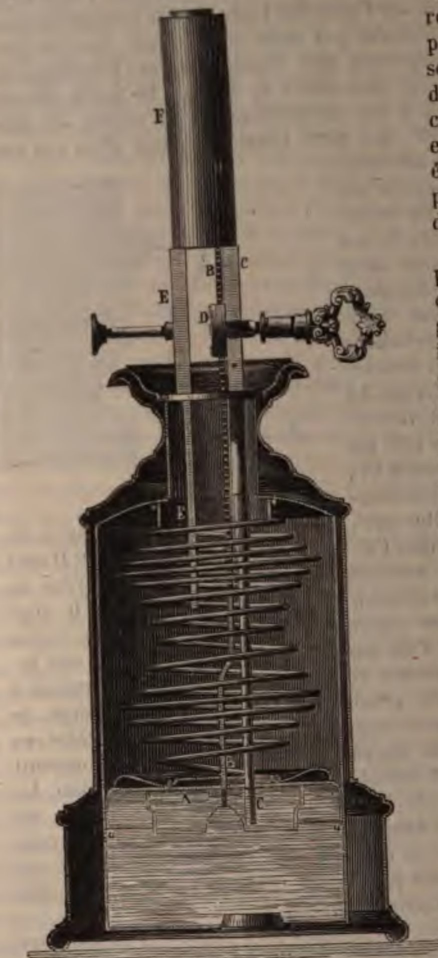


Fig. 435.

La figure 435 représente une coupe d'une lampe de ce genre. Le réservoir intérieur, destiné à contenir l'huile, fait fonction de corps de pompe. Un piston A est disposé dans ce réservoir, de manière à s'appuyer contre ses parois par tout son contour. Un ressort en hélice, fixé d'une part au piston, d'une autre part aux parois supérieures du réservoir, exerce constamment une pression sur le piston ; cette pression se transmet à l'huile située au-dessous du piston, et l'oblige à monter par le tuyau d'ascension qui la conduit jusqu'au bec. A mesure que le piston descend, la tension du ressort diminue, et au contraire la hauteur à laquelle l'huile doit être élevée augmente

deux causes doivent donc contribuer à diminuer progressivement la vitesse avec laquelle l'huile est amenée au bec. Mais, à l'aide d'une disposition particulière, on est parvenu à rendre le mouvement ascendant du liquide très-sensiblement régulier. Voici en quoi consiste cette disposition.

Le tuyau d'ascension C est formé de deux parties qui pénètrent l'une dans l'autre. (fig. 436). La partie inférieure est fixée au piston, qu'elle traverse, et descend avec lui sous l'action du ressort moteur. La partie supérieure, au contraire, reste immobile et sert, pour ainsi dire, de gaîne à l'autre, qui glisse à son intérieur en descendant avec le piston. Une tringle GG, représentée seule par la figure 437, se trouve placée suivant l'axe du tuyau d'ascension CC, et descend jusque dans sa partie inférieure. L'huile, en montant, est obligée de passer dans l'espace annulaire étroit qui existe entre les parois du tuyau d'ascension et le contour de cette tringle ; il en résulte une résistance au mouvement du liquide, qui fait que son mouvement ascendant est très-lent. Mais, en outre, la tringle GG n'est pas toujours engagée de la même quantité dans la partie la plus étroite du tuyau d'ascension, c'est-à-dire dans la partie de ce tuyau qui fait corps avec le piston et qui descend avec lui ; le passage étroit qui existe dans cette partie du tuyau, tout autour de la tringle GG, a une longueur d'autant plus grande que le piston est plus élevé, et par conséquent que le ressort est plus tendu. On voit donc que la résistance opposée au mouvement du liquide par la tringle GG, que l'on nomme le *modérateur*, diminue de plus en plus, à mesure que le piston descend, c'est-à-dire à mesure que la force du ressort décroît, et que la hauteur à laquelle l'huile doit être élevée va en augmentant ; on conçoit qu'on ait déterminé les dimensions du modérateur, de telle manière que le mouvement ascendant de l'huile soit sensiblement régulier.

Fig. 437.

Fig. 436.

Toute l'huile qui arrive au bec ne se brûle pas : il en retombe une certaine quantité qui vient se placer dans le réservoir, au-dessus du piston, de manière à baigner les spires inférieures du ressort. C'est aussi dans cette partie du réservoir que l'on intro-

duit l'huile pour remplir la lampe, et alors le ressort est complétement immergé. Supposons qu'on veuille faire fonctionner la lampe, dont le réservoir a été précédemment rempli d'huile; ou bien que cette lampe fonctionnant déjà depuis quelque temps, et le piston s'étant abaissé jusqu'au bas de sa course, on ait besoin de faire passer au-dessous de lui toute l'huile qui le surmonte, et qui est redescendue du bec. Il suffira de tourner la clef qui communique au pignon D (fig. 435). Ce pignon, en tournant, fera monter la tige à crémaillère BB, avec laquelle il engrène, et soulèvera en même temps le piston qui est fixé à cette tige. Les bords du piston sont simplement formés d'une bande de cuir *aa*, qui est recourbée vers le bas, et qui s'applique contre les parois du réservoir, en raison de la pression exercée contre elle par l'huile qui cherche à sortir. Lorsque le piston s'élève, par suite de l'action du pignon D sur la crémaillère BB, il tend à se produire un vide sous sa face inférieure ; la pression diminue au-dessous de lui, et l'huile qui le surmonte, pressée par l'atmosphère avec laquelle elle communique librement, fait fléchir la bande de cuir *aa*, pour se rendre dans le compartiment inférieur du réservoir, en passant tout autour du piston.

Le bouton opposé à la clef du pignon D est destiné à faire monter la tige à crémaillère EE, qui sert à élever plus ou moins la mèche, à l'intérieur du bec F.

§ 369. **Presse hydraulique.** — Nous avons déjà fait connaître (§ 218) le principe de la presse hydraulique. Occupons-nous maintenant d'indiquer la disposition qu'on donne à cette machine. La figure 438 la représente dans son ensemble, et la figure 439 en est une coupe destinée à montrer les parties intérieures. Un cylindre très-solide A renferme le piston B, auquel on doit appliquer une grande pression par l'intermédiaire de l'eau. Ce piston B porte sur sa tête un plateau C. C'est entre ce plateau, mobile avec le piston B, et le plateau fixe D, fortement relié au cylindre A par les colonnes E,E, que l'on met les corps à comprimer. L'eau est introduite dans le cylindre A au moyen d'une pompe F. Un levier GH, mobile autour du point H, se termine par une poignée G ; on le saisit par cette poignée, et on lui donne un mouvement de va-et-vient, en l'élevant et l'abaissant successivement. Ce mouvement se transmet au piston I de la pompe F, dont la tige est reliée au levier GH par une petite bielle articulée, d'une part à ce levier, d'une autre part à la tige du piston. Le mouvement du piston est d'ailleurs guidé par un anneau fixe K, dans lequel se meut librement l'extrémité supérieure de sa tige. A chaque coup de piston, de l'eau est puisée dans un réservoir

cé sous la pompe, puis refoulée dans le tuyau L, qui communique avec le cylindre A. M et N sont les deux soupapes qui blissent et interceptent alternativement la communication du

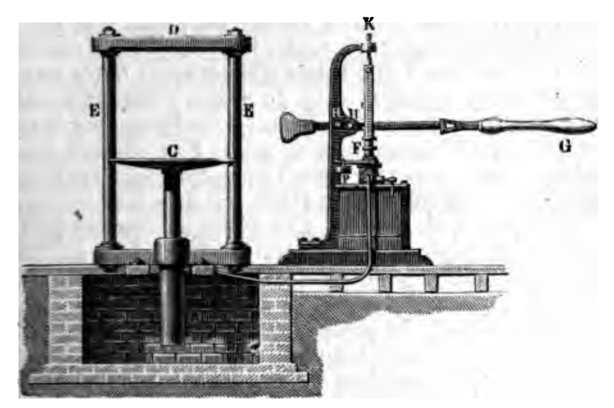


Fig. 438.

rps de pompe avec le tuyau d'aspiration et avec le tuyau de foulement L.

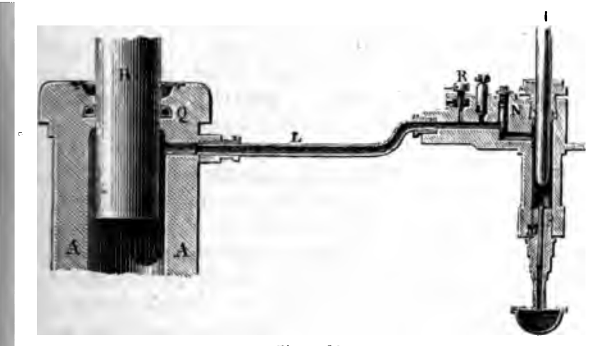


Fig. 439.

On voit que la pompe F, à l'aide de laquelle l'eau est refoulée s le cylindre A, est une pompe à piston plongeur, comme les de Marly, que nous avons décrites précédemment (§ 359). cylindre A et le piston B ont aussi une disposition analogue.

Pour réaliser l'idée de Pascal, qui, comme nous l'avons dit, (l'inventeur de la presse hydraulique, il y avait à vaincre u difficulté qui ne se présente pas au même degré dans la co truction des pompes : il fallait trouver le moyen d'empêch toute espèce de fuite entre la surface du piston B et les p tions de parois du cylindre A contre lesquelles il frotte en mo tant. S'il y avait une fuite, même très-petite, la faible quant d'eau introduite à chaque coup du piston I déterminerait sortie d'une égale quantité de l'eau déjà contenue dans le cyli dre A, et la pression transmise au piston B ne pourrait pas d passer une limite assez restreinte. La pression rapportée à l'uni de surface est la même sous le piston B et sous le piston I, lo que la soupape N est ouverte, c'est-à-dire au moment où l'e est refoulée par le piston I ; cependant une fuite qui se produir autour de ce dernier piston n'entraînerait pas la même con quence que si elle avait lieu autour du piston B. On voit, en eff que si le mouvement du piston I est un peu rapide, toute l'e qu'il refoule n'aura pas le temps de sortir par la fuite que no supposons exister le long de sa surface, et qu'en conséquence u portion de cette eau devra toujours passer de l'autre côté de soupape N. C'est donc autour du piston B qu'on doit surtout évil les fuites avec le plus grand soin, afin que la pression appliqu à ce piston puisse être rendue considérable, et aussi afin q cette pression persiste lorsqu'on ne manœuvre plus le piston I.

Bramah, ingénieur anglais, est le premier qui soit parve (en 1796) à remplir la condition qui vient d'être indiquée, e construire des machines réellement utiles, d'après le princi de Pascal. Depuis cette époque, la presse hydraulique joue rôle très-important dans l'industrie. Le moyen imaginé par Br mah, pour empêcher l'eau de passer autour du piston B consi à établir autour de ce piston une garniture de cuir Q d'une pèce particulière. C'est une sorte de bourrelet formé de la m nière suivante : on taille un morceau de cuir en forme de disq circulaire ; on pratique ensuite au milieu de ce disque, une o verture circulaire, de manière à ne laisser qu'un anneau pl enfin, après avoir amolli le cuir, par un séjour prolongé dans liquide, on façonne cet anneau de manière à refouler ses bo intérieurs et extérieurs au-dessous de s plan, et à lui donner la forme qui est r présentée ici (fig. 440). La pièce de c ainsi préparée prend le nom de *cuir e bouti* ; on la place vers le haut du cyl dre A, dans une cavité circulaire disposée à cet effet, et l'

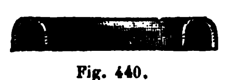


Fig. 440.

introduit le piston B, qui frotte contre ses bords intérieurs. Lorsque de l'eau est introduite dans le cylindre A, elle pénètre jusque dans la concavité annulaire que présente le cuir embouti sur tout son contour ; la pression qu'elle exerce contre ce cuir applique ses bords contre la surface du piston B, et cela d'autant plus fortement que cette pression est plus considérable, en sorte qu'il ne peut se produire aucune fuite.

Lorsque l'on a placé des corps à comprimer, entre les deux plateaux C, D (fig. 438), et que l'on manœuvre le levier GH, on n'a d'abord qu'une faible pression à exercer sur l'eau ; cette pression augmente à mesure que les corps se compriment, et l'on éprouve une difficulté de plus en plus grande à faire jouer la pompe F. Si la plus grande pression qu'on peut ainsi exercer sur l'eau en agissant à l'extrémité du levier, n'est pas suffisante pour l'effet qu'on veut produire, on retire le boulon H, qui sert de point d'appui au levier, et on l'introduit en H'. De cette manière on diminue de moitié le bras de levier sur lequel agit la résistance provenant du piston I ; et l'on peut, par conséquent, avec une même force appliquée à la poignée G, exercer une plus grande pression sur le liquide intérieur.

Pour éviter que la pression transmise au liquide ne devienne trop grande, ce qui pourrait avoir pour résultat de déterminer la rupture de certaines parties de la machine, on dispose près de la pompe F une soupape de sûreté, qui est ici représentée à part (fig. 441). Une soupape conique O intercepte un conduit par lequel l'eau contenue à l'intérieur de la presse pourrait s'écouler au dehors ; cette soupape supporte sur sa tête une pression produite par un levier qui est chargé d'un poids P à son extrémité. On détermine d'avance ce poids P, de telle manière que la soupape O ne cède à la pression du liquide que lorsque cette pression dépasse la limite en deçà de laquelle on veut toujours la maintenir.

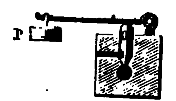


Fig. 441.

Une vis R (fig. 439), dont l'extrémité inférieure forme soupape, ferme habituellement un autre conduit par lequel l'eau intérieure pourrait également s'écouler. On se sert de cette vis lorsqu'on veut faire cesser l'action de la presse. En la faisant tourner dans un sens convenable, on ouvre le conduit qu'elle fermait ; l'eau intérieure s'écoule au dehors, et le piston B, n'étant plus soumis à la pression que lui transmettait le liquide, redescend à l'intérieur du cylindre A.

On pourrait se demander si, en donnant des formes différentes à la partie inférieure du piston B, on ne ferait pas varier la gran-

deur de la pression totale qui tend à le soulever. Pour une mên pression appliquée au liquide à l'aide du piston I, produirait-o plus d'effet sur le piston B, en le terminant inférieurement p une face concave, qu'en le terminant en pointe? Si l'on a bi compris les principes relatifs aux pressions qu'un liquide exer sur les parois avec lesquelles il est en contact (§ 221 et suiv.), o n'hésitera pas à dire que la pression totale qui tend à soulever piston B ne dépend nullement de la forme de la partie de ce pi ton qui est plongée dans le liquide; elle ne dépend que de grandeur de la section transversale du piston, dans la partie de surface qui est placée au milieu du cuir embouti. Si cette secti transversale est 10 fois, 100 fois, 1 000 fois plus grande que la se tion analogue du piston I, la pression supportée par le piston sera 10 fois, 100 fois, 1 000 fois plus grande que celle qu'on appliq au piston I, à l'aide du levier GH (§ 218). On doit observer qu sous ce rapport, il y a une très-grande différence entre les lo des pressions qu'un corps solide éprouve de la part d'un liqui en repos, ou de la part d'un liquide en mouvement. Dans c dernier cas, les pressions peuvent être très-différentes, pour d corps de même section transversale rencontrés par un même l quide animé d'une même vitesse, si les surfaces que le liqui vient rencontrer n'ont pas la même forme (§ 325).

§ 370. La presse hydraulique est très-employée dans l'industri On s'en sert pour comprimer les draps et les papiers, dans la f brication des bougies, du vermicelle, etc., etc. En général, lor qu'on a à exercer une très-forte pression, on a recours habituell ment à la presse hydraulique, qui est d'un usage très-commod C'est ainsi que, dans l'établissement impérial de la Chaussad près de Nevers, où l'on fabrique des câbles de fer pour la m rine, on éprouve les câbles en les soumettant à une force d traction produite au moyen d'une presse hydraulique.

Nous avons dit (§ 187) que les roues des wagons destinés à ci culer sur les chemins de fer sont fixées aux extrémités des essieu en sorte que chaque essieu et les deux roues qui le terminent fo ment une seule pièce solide. L'essieu et chacune des deux rou se construisent cependant à part, et ce n'est que lorsque ces tro pièces sont achevées qu'on les réunit. A cet effet, on a tourné l extrémités de l'essieu pour leur donner une forme très-légèremen conique, et l'on a pratiqué dans les moyeux des roues des ouver tures d'une forme exactement pareille à la précédente, destiné à recevoir à leur intérieur les extrémités des essieux. Mais ce pièces sont travaillées de telle manière qu'on ne peut faire ain pénétrer les extrémités des essieux dans les ouvertures centrale

des roues qu'en leur appliquant des efforts considérables. C'est encore à la presse hydraulique que l'on a habituellement recours pour exercer ces efforts.

Il y a quelques années, on a construit en Angleterre un pont tubulaire qui traverse le bras de mer compris entre le comté de Carnarvon et l'île d'Anglesey. Ce pont, d'une longueur totale de 455 mètres, est formé de deux immenses tubes de tôle, placés à côté l'un de l'autre, à l'intérieur desquels passent les deux voies du chemin de fer de Chester à Holyhead; il n'est supporté entre ses extrémités que par trois tours, qui le divisent en quatre travées dont les deux moyennes, plus grandes que les deux autres, ont chacune 140 mètres de portée. Les portions de tubes correspondant à ces travées moyennes ont été construites séparément au bord de la mer; on les a transportées sur des pontons, jusqu'au pied des tours qui devaient former les piles du pont; et c'est ensuite à l'aide de presses hydrauliques qu'on a élevé ces tubes gigantesques pour les poser sur le haut de ces tours.

EMPLOI DE L'EAU COMME MOTEUR.

§ 371. Création d'une chute d'eau. — Lorsque nous avons énuméré les diverses espèces de moteurs (§ 198), nous avons indiqué les cours d'eau comme constituant un moteur de la plus grande importance. Nous sommes en mesure maintenant d'entrer dans les développements convenables, pour faire connaître le mode d'action de ce genre de moteur, ainsi que les dispositions des diverses machines motrices (§ 199) qui reçoivent cette action pour la transmettre à des mécanismes de toute sorte destinés à effectuer du travail utile.

Le mouvement de l'eau dans un cours d'eau est dû à l'action de la pesanteur. Chaque molécule liquide, en parcourant une portion de ce cours d'eau, s'abaisse verticalement d'une certaine quantité; cet abaissement donne lieu à la production d'une certaine quantité de travail moteur, qu'on obtiendrait en multipliant le poids de la molécule par la différence de niveau des deux extrémités du chemin qu'elle a parcouru (§ 77). C'est ce travail développé par l'action de la pesanteur sur les diverses molécules liquides, qu'il s'agit d'utiliser au lieu de le laisser absorber par le travail résistant qu'occasionne le frottement de l'eau sur elle-même et sur les parois solides entre lesquelles elle est renfermée (§ 307).

Pour y arriver, on établit un barrage à travers le cours d'eau. Ce barrage s'opposant au passage de l'eau qui arrive constamment

dans le lieu où on l'a établi, il en résulte que le niveau de l'ea
s'élève en amont, et s'abaisse en aval. Concevons que le barra
se termine vers le haut par une crête horizontale, et que l'ea
après s'être accumulée dans le bief d'amont, s'écoule dans le bi
d'aval en passant par-dessus cette crête, ce qui constituera u
déversoir (§ 314). Le mouvement s'établira de manière que
quantité d'eau fournie par le déversoir, dans un temps donné, se
précisément égale à celle qui passait dans le même temps à tr
vers une section transversale du cours d'eau, avant l'établiss
ment du barrage. Cette quantité d'eau, en passant ainsi du bi
supérieur dans le bief inférieur, tombera d'une hauteur égale
la différence de niveau du liquide dans ces deux biefs ; en mu
tipliant cette hauteur par le poids de l'eau écoulée, on aura
mesure du travail moteur développé dans la chute du liquid
travail que l'on pourra utiliser, en l'appliquant à une machin

§ 372. **Force d'une chute d'eau.** — D'après ce qui vient d'ê
dit, il est aisé d'évaluer en chevaux-vapeur (§ 201) la force de
chute qu'on produirait dans un cours d'eau dont on connaît le d
bit, en y établissant un barrage qui donnerait lieu à une dif
rence de niveau déterminée dans les biefs d'amont et d'av
Prenons pour exemple la Seine à Paris, et cherchons la force
la chute que l'on obtiendrait en construisant un barrage da
le bras droit de ce fleuve, un peu au-dessus du Pont-Neu
comme on en a le projet. Ce bras de la Seine, au moment d
basses eaux, débite environ 100 mètres cubes d'eau par second
Le barrage dont il vient d'être question pourrait donner lieu
une chute de 1m,50 de hauteur. Donc cette chute produirait,
une seconde, un travail de 150 000 kilogrammètres. Si l'on divi
ce nombre par 75, on trouvera que la force de la chute qu'o
veut créer près du Pont-Neuf peut être évaluée à 2 000 chevau
vapeur, pour l'époque des basses eaux.

Les éléments qui entrent dans la détermination de la for
d'une chute d'eau varient aux diverses époques de l'anné
D'une part, la quantité d'eau que débite le cours d'eau en u
seconde est plus ou moins grande ; d'une autre part, la différen
de niveau dans les biefs d'amont et d'aval diminue à mesure q
le débit augmente. Quoique ces deux éléments varient en se
contraire l'un de l'autre, il en résulte toujours une variation
même sens dans la force de la chute ; cette force est d'auta
plus grande que le cours d'eau fournit une plus grande qua
tité de liquide en une seconde.

§ 373. **Conditions que doivent remplir les moteurs h
drauliques.** — L'eau d'une chute peut rarement agir d'el

même, sans intermédiaire, pour produire du travail utile ; nous en verrons cependant quelques exemples. Le plus ordinairement, l'eau agit sur une machine, qui n'a d'autre objet que de recevoir son action, pour la transmettre ensuite aux machines spéciales qui doivent l'utiliser. On doit naturellement se proposer de construire cette machine motrice de telle manière que l'eau de la chute lui transmette la totalité du travail moteur qu'elle produit en tombant du bief supérieur dans le bief inférieur. Il est impossible de satisfaire complétement à cette condition ; mais il faut chercher à en approcher le plus possible.

Pour donner une idée nette de la force d'une chute d'eau, nous avons supposé qu'après avoir construit un barrage en travers du cours d'eau, on laissait l'écoulement de l'eau s'établir naturellement par-dessus la crête du barrage ; en sorte que l'eau tombait librement depuis le niveau du bief d'amont jusqu'à celui du bief d'aval, et c'est le travail produit par cette chute du liquide qu'il s'agirait de transmettre à une machine motrice. Mais il n'est pas nécessaire que l'eau quitte le bief d'amont à la hauteur de la surface libre du liquide qui y est contenu ; on peut pratiquer une ouverture dans le barrage, soit vers le bas, soit en un point quelconque situé entre les niveaux des deux biefs, et la quantité de travail que l'eau sera capable de produire, en se rendant ainsi d'un bief dans l'autre, sera toujours la même que si elle tombait librement d'un niveau à l'autre. C'est ce dont on s'assurera sans difficulté, en examinant, par exemple, ce qui aurait lieu, si l'écoulement de l'eau se produisait par l'ouverture d'une vanne située à la hauteur du niveau dans le bief inférieur ; la vitesse d'écoulement du liquide par cette ouverture serait précisément la même que celle qui aurait été acquise par ce liquide, s'il était tombé librement de toute la hauteur de la chute (§ 282). En sorte que, si l'on ne veut faire agir l'eau sur une machine motrice qu'après qu'elle aura pris toute la vitesse qu'elle peut recevoir de l'action de la pesanteur, en raison de la hauteur de la chute, peu importe qu'on la fasse arriver d'une manière ou de l'autre au niveau du bief inférieur, puisque dans les deux cas elle acquerra la même vitesse.

On pourrait objecter, il est vrai, qu'en faisant passer l'eau du bief supérieur dans le bief inférieur, par l'ouverture d'une vanne, on pourrait donner à cette ouverture des dimensions telles, qu'il s'écoulerait dans un temps donné une quantité d'eau beaucoup plus grande que celle qui se serait écoulée dans le même temps par le haut du barrage ; et que, comme la vitesse du liquide est toujours celle qui est due à la hauteur de la

chute, la quantité de travail produite pendant le temps dont
s'agit aurait été augmentée par l'emploi d'une vanne. Ce
augmentation de travail ne fait pas de doute : mais il faut obs
ver que la vanne, en débitant plus d'eau que n'en fournit
cours d'eau, détermine un abaissement du niveau dans le b
d'amont : ce bief se vide, et par conséquent, on sera obligé
fermer la vanne pendant quelque temps, pour attendre qu'il
remplisse de nouveau. En somme, si l'on veut profiter régul
rement de l'action d'une chute d'eau, on devra faire en so
par exemple, que le niveau du bief d'amont soit le même
commencement de chaque journée; et, par suite, la vanne,
quelque manière qu'on la manœuvre dans l'intervalle
24 heures, ne devra toujours laisser passer que la quantité d'e
fournie par le cours d'eau pendant ce temps. L'emploi d'u
vanne laissant couler l'eau vers le bas de la hauteur de ch
n'augmentera donc pas la quantité totale de travail produite p
l'eau dans l'espace d'une journée; mais cela permettra de r
partir ce travail autrement qu'il ne le serait, si l'eau s'écoul
par le haut du barrage, comme nous l'avions supposé d'abo
C'est ainsi que, si chaque jour on n'ouvre la vanne que 12 heur
au lieu de la laisser ouverte pendant les 24 heures, le trav
produit en une heure pourra être doublé : une chute dont
force aurait été évaluée à 15 chevaux (§ 372) agirait pendant
12 heures avec une force de 30 chevaux.

Il résulte de ce qui précède que la quantité de travail q
l'eau est capable de produire est toujours la même de quelq
manière qu'on la fasse passer du bief supérieur dans le bief
férieur. Mais il faut pour cela, bien entendu, que les circ
stances dans lesquelles se produit cet écoulement ne donn
lieu à aucune perte de vitesse; car une pareille perte entraî
rait nécessairement une perte correspondante dans la quant
de travail que la vitesse de l'eau doit produire en agissant
la machine motrice. Il faut, en conséquence, disposer les orifi
par lesquels l'eau doit s'écouler, de manière à éviter les ch
gements brusques de direction des filets liquides, c'est-à-d
qu'il faut employer des orifices *évasés* (§ 289); on doit aussi évi
de faire couler l'eau avec une grande vitesse dans un canal d'u
certaine longueur, afin de ne pas donner lieu aux pertes de
tesse occasionnées par les frottements du liquide sur les pa
et sur lui-même (§ 298).

Si nous examinons maintenant la machine motrice, à laqu
l'eau doit transmettre le travail développé par sa chute, n
verrons que l'eau arrive dans cette machine avec une certa

vitesse, qui peut être très-grande ou très-petite, suivant les cas, et qu'elle en sort ensuite pour se rendre dans le bief inférieur. Sans nous préoccuper des dispositions diverses qu'on peut donner à une pareille machine, dispositions que nous indiquerons en détail dans un instant, nous pouvons reconnaître qu'en général elle doit satisfaire à deux conditions essentielles. Premièrement, l'eau doit agir sans choc, c'est-à-dire que, depuis le moment où elle est sur le point d'entrer dans la machine, jusqu'au moment où elle l'a abandonnée complétement, il ne doit pas y avoir de changements brusques, soit dans la direction, soit dans la grandeur de la vitesse des différentes molécules liquides. Secondement, l'eau doit sortir de la machine de manière à n'avoir qu'une très-faible vitesse, sinon une vitesse nulle, lorsqu'elle arrive dans le bief inférieur; car si elle y arrivait avec une vitesse appréciable, elle serait capable de produire une certaine quantité de travail, en raison de cette vitesse, et en conséquence elle n'aurait pas transmis à la machine motrice la totalité du travail qu'elle pouvait produire.

Ainsi, en résumé, dans l'établissement d'un moteur hydraulique, on doit toujours avoir en vue de satisfaire aux conditions suivantes : 1° l'eau doit être amenée du bief d'amont dans la machine, en éprouvant le moins possible de perte de vitesse; 2° elle doit agir sans choc; 3° elle doit arriver sans vitesse dans le bief d'aval. Ces conditions ne peuvent pas être remplies d'une manière rigoureuse; aussi n'arrive-t-il jamais que la force d'un moteur hydraulique soit la même que celle de la chute qui le fait mouvoir : elle n'en est qu'une fraction plus ou moins grande, suivant que le mode d'action de l'eau se rapproche plus ou moins de l'état idéal qui est indiqué par les conditions précédentes. Pour juger de la bonté d'un moteur hydraulique, on déterminera par l'expérience (§ 200) la quantité de travail qu'il est capable de produire dans un temps donné, et l'on cherchera le rapport de cette quantité de travail à celle que fournit la chute d'eau dans le même temps; le moteur sera d'autant meilleur que ce rapport se rapprochera plus de l'unité.

§ 374. **Roue en dessous, à aubes planes.** — Entrons maintenant dans le détail des diverses dispositions qui ont été imaginées pour les moteurs hydrauliques. Le plus habituellement, ces moteurs sont des roues auxquelles l'eau imprime un mouvement de rotation autour de leur axe, qui est placé, soit horizontalement, soit verticalement; ces roues prennent le nom de *roues hydrauliques*. Nous étudierons d'abord celles dont l'axe est horizontal. On les divise ordinairement en roues en dessous, roues

en dessus, et *roues de côté*, suivant que l'eau arrive dans la roue vers sa partie inférieure, ou vers sa partie supérieure, ou bien en un autre point de son contour.

La roue en dessous, à aubes planes (fig. 442), se place en avant

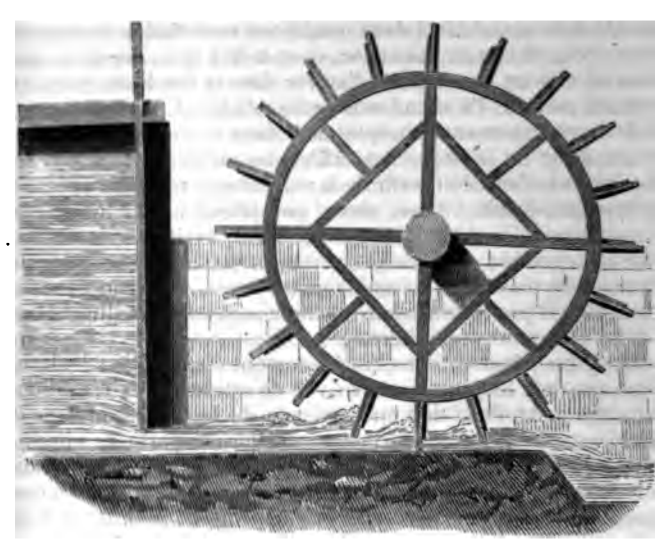


Fig. 442.

d'une vanne qu'on lève d'une certaine quantité, pour laisser couler l'eau par sa partie inférieure. L'eau sort de la vanne avec la vitesse due à la hauteur du niveau dans le bief au-dessus de l'orifice ; un coursier horizontal, ou légèrement incliné, l'amène sous la roue ; et elle lui imprime un mouvement de rotation, en exerçant une pression sur les aubes ou palettes dont elle est munie sur tout son contour. Sous l'action de l'eau, la roue prend une certaine vitesse, qui dépend des résistances qu'elle a à vaincre ; cette vitesse est d'autant plus petite que les résistances sont plus considérables. On sait, en effet, que la pression exercée par l'eau sur les aubes de la roue, lorsqu'elles sont en mouvement, n'est pas la même que lorsqu'elles sont immobiles, et que, de plus, cette pression est d'autant plus faible qu'elles se meuvent plus rapidement (§ 324). Il en résulte que, pour vaincre une résistance donnée, la roue prendra, sous l'action de l'eau, une vitesse particulière, pour laquelle il faut que la pression de l'eau sur

les aubes soit en rapport avec la grandeur de cette résistance. Si, par une cause quelconque, sa vitesse devenait accidentellement plus petite, la pression de l'eau sur les aubes augmenterait; une portion seulement de cette pression ferait équilibre à la résistance, et l'autre portion accélérerait le mouvement de la roue, jusqu'à ce que l'équilibre fût rétabli entre la pression exercée par l'eau et la résistance à vaincre. Si, au contraire, la roue prenait momentanément un mouvement plus rapide, la diminution qui en résulterait dans la pression de l'eau sur les aubes rendrait la résistance prédominante, et le mouvement se ralentirait.

On conçoit, d'après ce qui précède, que l'on puisse faire prendre à la roue telle vitesse qu'on voudra, en réglant convenablement la grandeur de la résistance qu'elle aura à vaincre. Mais la quantité de travail réellement transmise à la roue par l'action de l'eau ne sera pas la même, suivant que la roue tournera avec telle ou telle vitesse. Pour que la roue marche très-rapidement, il faut qu'elle n'ait à vaincre qu'une faible résistance; si on lui oppose une résistance considérable, elle ne prendra qu'un mouvement très-lent. Or, le travail effectué par la roue dans un temps donné dépend à la fois de la grandeur de la résistance vaincue et de l'étendue du chemin parcouru pendant ce temps, par le point d'application de cette résistance, ou, ce qui revient au même, de la vitesse de la roue. Dans l'un et dans l'autre des deux cas extrêmes qu'on vient de considérer, l'un des éléments du travail est très-petit, et, par suite, le travail lui-même ne peut pas être grand. Il doit donc exister une certaine vitesse de la roue, qui ne soit ni trop grande ni trop petite, pour laquelle le travail effectué surpasse celui que la roue produirait avec toute autre vitesse. L'expérience a appris que, pour obtenir ce maximum de travail, il faut que la vitesse de la roue, mesurée à sa circonférence, soit les 0,45 de celle de l'eau, au moment où elle arrive sur les aubes.

Les roues en dessous, à aubes planes, sont loin de satisfaire aux conditions que nous avons indiquées en général pour les moteurs hydrauliques (§ 373). En premier lieu, l'eau perd une portion de sa vitesse, avant d'atteindre la roue, par son frottement contre les parois du coursier qui l'amène de la vanne sur les aubes; en second lieu, au moment où l'eau rencontre une des aubes de la roue, elle perd brusquement sa vitesse, pour prendre la vitesse de la roue; en troisième lieu, l'eau quitte la roue en conservant une vitesse considérable, qui donne lieu à ce bouillonnement que l'on observe dans le bief d'aval, jusqu'à une grande distance de la roue. *Aussi* les roues de cette espèce sont-elles de

très-mauvais moteurs hydrauliques. En mesurant, à l'aide du frein dynamométrique, la quantité de travail transmise par l'eau à la roue, on a reconnu que, lorsque la roue a la vitesse la plus convenable, cette quantité de travail ne dépasse pas les 0,25 de celle qui correspond à la quantité d'eau dépensée : le quart seulement de la force de la chute est utilisé par la roue, et les trois autres quarts sont entièrement perdus.

§ 375. **Roue à augets.** — La roue en dessus, ou roue à augets (fig. 443), est disposée de manière que l'eau soit amenée à sa partie

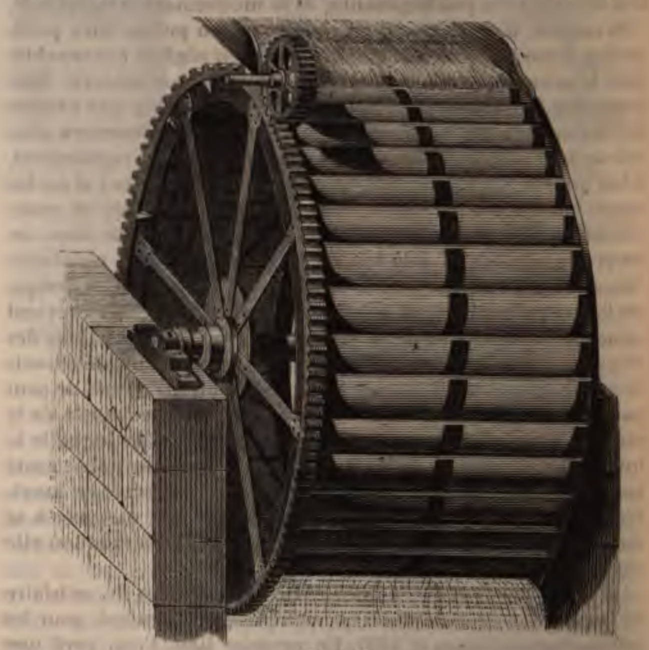


Fig. 443.

supérieure par un canal qui la prend dans le bief d'amont, au niveau de la surface du liquide dans ce bief. L'eau ne prend dans ce canal que la vitesse nécessaire pour qu'elle puisse atteindre la roue; elle tombe de là dans des compartiments ou *augets* dont la roue est munie sur tout son contour, et les remplit successivement, à mesure que, par le mouvement de la roue, ils se présentent à l'extrémité du canal d'amenée. Lorsque les augets arrivent au

bas de la roue, l'eau en sort pour tomber dans le bief d'aval, et ils remontent vides, pour se remplir de nouveau lorsqu'ils seront sur le point de redescendre. On voit, par là, que les augets compris dans la partie descendante de la roue sont constamment pleins d'eau, tandis que ceux qui se trouvent dans la partie ascendante sont vides; c'est le poids de l'eau qui est ainsi contenue dans une moitié de la roue, qui détermine son mouvement et lui fait vaincre des résistances.

Dans la construction d'une roue de ce genre, on doit surtout avoir en vue de disposer les augets de manière qu'ils ne se vident que le plus bas possible; car si l'eau en sort avant qu'ils aient atteint le bas de la roue, il en résulte une perte de travail. Mais il faut, en même temps, que l'ouverture de chaque auget ne soit pas trop étroite, afin que l'eau puisse y entrer et en sortir sans difficulté. Les figures 444, 445 et 446 montrent des dispositions



Fig. 444.


Fig. 445.


Fig. 446.

qui sont fréquemment adoptées. Pour que l'air qui doit sortir de l'auget lorsque l'eau y arrive, ou bien qui doit y entrer lorsque l'auget se vide, ne gêne pas le passage du liquide, ce qui pourrait nuire beaucoup à l'effet produit, on a soin de pratiquer quelques petits trous au fond de l'auget. La présence de ces trous occasionne bien la perte d'une certaine quantité d'eau, qui les traverse et ne reste pas dans l'auget; mais cette perte est de peu d'importance.

Une roue à augets donne des résultats d'autant meilleurs qu'elle tourne plus lentement, et cela pour plusieurs motifs. D'abord le mouvement de rotation de la roue, auquel participe l'eau contenue dans les augets, détermine une force centrifuge qui modifie la forme de la surface libre du liquide dans chaque

auget; cette surface s'abaisse vers l'intérieur de la roue, et se relève vers l'extérieur, de telle sorte que l'eau tend à sortir de l'auget plus tôt qu'elle ne le ferait sans cela. D'un autre côté, l'eau, arrivant avec une faible vitesse par le canal d'amenée, ne produira pas de choc à son entrée dans les augets, si la roue ne marche que lentement ; et lorsque les augets se videront, l'eau sera, pour ainsi dire, déposée sans vitesse dans le bief d'aval. Avec cette condition d'une faible vitesse de rotation, on voit que la roue à augets satisfait beaucoup mieux que la roue en dessous aux conditions générales qu'on doit chercher à faire remplir aux moteurs hydrauliques. Aussi les roues à augets bien établies utilisent-elles les 0,75 du travail moteur développé par l'action de l'eau. Ces roues doivent être employées de préférence à toutes les autres, pour les chutes dont la hauteur est comprise entre 3 mètres et 12 mètres.

Le mouvement de rotation d'une roue à augets devant être lent, on la munit ordinairement d'une roue dentée, qui fait corps avec elle, et qui engrène avec une roue beaucoup plus petite. On transmet ainsi à l'arbre de cette seconde roue un mouvement de rotation aussi rapide qu'on veut.

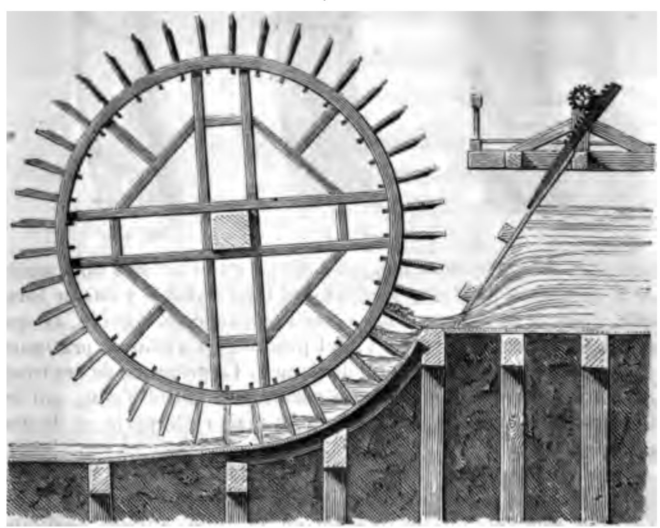


Fig. 447.

§ 376. **Roue de côté.** — La roue de côté (fig. 447) est une roue

à aubes planes, qui est emboîtée dans un coursier circulaire, et qui reçoit l'eau à la partie supérieure de ce coursier. Elle tient à la fois de la roue en dessous et de la roue à augets. L'eau agit d'abord sur les aubes par son choc, au moment où elle entre dans la roue ; puis elle est maintenue sur ces aubes par le coursier, qui s'oppose à ce qu'elle s'écoule de part et d'autre, et elle agit ainsi par son poids, jusqu'à ce qu'elle soit arrivée au bas de la roue.

En variant la disposition de la roue, on peut faire prédominer plus ou moins l'un ou l'autre de ces deux modes d'action de l'eau ; or, il est clair que, d'après ce que nous avons dit dans les paragraphes précédents, on devra surtout chercher à rapprocher la roue de côté de la roue à augets, qui utilise une bien plus grande portion du travail moteur développé par l'eau que la roue en dessous. Pour cela, au lieu de donner l'eau à la roue par le bas d'une vanne (fig. 447), on la fait arriver sur les aubes par le haut d'une vanne qui s'abaisse (fig. 448), de manière à produire l'é-

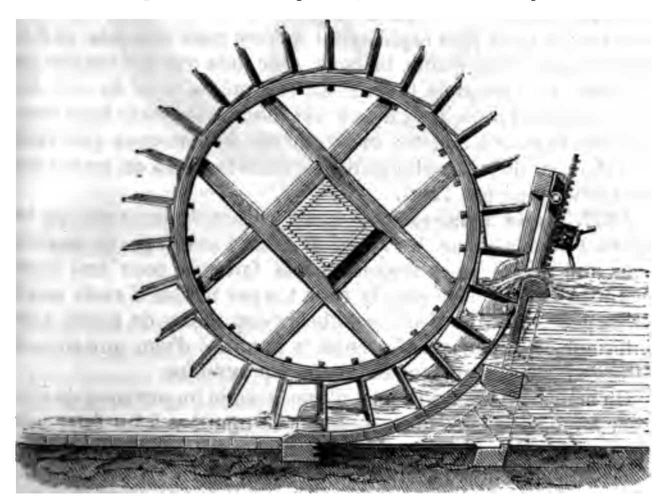


Fig. 448.

coulement comme par un déversoir. L'eau vient ainsi rencontrer les aubes avec une faible vitesse, et agit presque exclusivement par son poids pour faire tourner la roue.

Si l'on compare la roue de côté, disposée comme nous venons de le dire en dernier lieu, avec la roue à augets, on verra qu'elle présente certains avantages relativement à cette dernière roue.

Poncelet satisfait, autant que peut le faire une roue en dessous, aux conditions générales énoncées précédemment (§ 373).

L'expérience a fait voir que, pour que la roue produise le maximum d'effet, il faut que sa vitesse, à la circonférence, soit les 0,55 de celle de l'eau. Dans ce cas, le rapport du travail transmis à la roue, au travail que présente la quantité d'eau dépensée, s'élève à 0,56, ou même à 0,60; tandis que, comme nous l'avons dit, ce rapport est seulement de 0,25, lorsqu'il s'agit d'une roue en dessous, à aubes planes.

§ 378. **Roue plongeant dans un courant indéfini.** — Pour faire connaître les diverses roues hydrauliques à axe horizontal, nous devons encore parler des roues à palettes planes, que l'on place dans le courant d'une rivière, de manière à les faire plonger dans l'eau par leur partie inférieure. Ces roues (fig. 450), que l'on installe ordinairement sur les flancs de bateaux solidement amarrés, sont mises en mouvement par la pression que l'eau exerce sur celles de leurs palettes qui sont immergées. Il n'y a pas ici à examiner si, en donnant telle ou telle forme à la roue, on utilisera par son emploi une fraction plus ou moins grande du travail moteur dont on dispose. Ce travail moteur, développé par la totalité de l'eau qui coule dans la rivière, est surabondant; on n'a besoin d'en utiliser qu'une faible portion, et l'on n'est généralement pas limité dans la largeur qu'on peut donner à la roue. Aussi préfère-t-on employer une roue d'une construction très-simple, quoique peu avantageuse, sauf à obtenir par un élargissement des aubes ce qu'une meilleure disposition aurait pu donner avec de moins grandes dimensions.

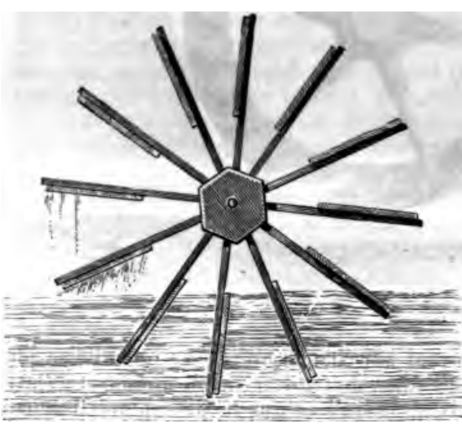


Fig. 450.

Une roue de ce genre ne produit pas toujours la même quantité de travail, suivant qu'elle marche plus ou moins vite, dans

un même courant. L'expérience a fait reconnaître que la vitesse des palettes, prise au milieu de leur hauteur, devait être les 0,40 de celle de l'eau, pour que le travail transmis par l'eau à la roue fût le plus grand possible.

§ 379. **Roue à cuillers.**—Les roues à axe vertical sont depuis longtemps employées, surtout dans le midi de la France, pour faire mouvoir des moulins. Elles se prêtent mieux que les autres à ce genre de travail, en raison de la simplicité de la transmission du mouvement de la roue motrice à la meule courante (§ 150); le même arbre vertical porte la roue à sa partie inférieure, et la meule courante à sa partie supérieure. Ces roues sont de deux espèces : les *roues à cuillers*, et les *roues à cuve.*

Une roue à cuillers (fig. 451) est formée d'une sorte de moyeu

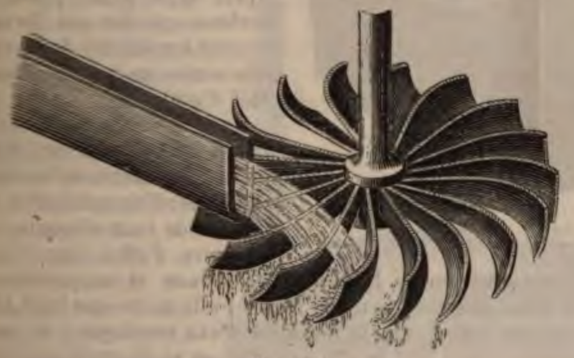


Fig. 451.

dans lequel sont implantées des pièces de bois taillées de manière à présenter à l'eau une surface concave et oblique ; ces diverses pièces sont désignées sous le nom de *cuillers*. L'eau est amenée sur la roue par un petit canal de bois, ou par une buse adaptée à la partie inférieure d'un réservoir. Chaque cuiller, en tournant, vient recevoir l'action de l'eau ; et les chocs successifs que reçoit ainsi la roue entretiennent son mouvement.

On a trouvé que ces roues pouvaient utiliser environ le tiers du travail moteur développé par la chute d'eau ; et que, pour cela, la vitesse des points de la roue qui sont directement choqués par l'eau devait être environ les 0,70 de celle du liquide. Ces roues conviennent bien, en raison de leur grande simplicité, pour des chutes un peu grandes qui ne fournissent pas beaucoup d'eau.

§ 380. **Roue à cuve.** — Les roues à cuve ont une forme ana-

logue à celle des roues à cuillers; mais, au lieu d'être isolées et de recevoir le choc d'une veine liquide qui vient tomber en un point de leur contour, elles sont installées dans une cuve cylindrique de maçonnerie qui est ouverte par le bas. L'eau motrice est amenée dans cette cuve, tangentiellement à sa circonférence, par un canal A (fig. 452), qui aboutit au-dessus de la face supérieure de la roue; elle tourbillonne dans la cuve en vertu de la vitesse qu'elle possède, et, en descendant ainsi dans la roue, elle l'entraîne dans son mouvement giratoire. Après avoir passé entre les surfaces courbes qui forment comme les palettes de la roue, elle tombe au-dessous, dans le bief d'aval.


Fig. 452.

Le mouvement de l'eau dans la cuve détermine des frottements qui diminuent beaucoup sa vitesse; d'un autre côté, une portion de l'eau s'écoule, sans produire d'effet, par l'intervalle qui existe entre le contour de la roue et les parois de la cuve. Aussi une roue à cuve n'utilise-t-elle guère que les 0,16 du travail que représente la quantité d'eau employée; et, en la construisant avec tout le soin possible, on ne pourrait pas élever au delà de 0,25 ce rapport entre le travail transmis à la roue et le travail dépensé. Les roues à cuve sont employées principalement lorsqu'on a à sa disposition une grande quantité d'eau tombant d'une faible hauteur.

§ 381. **Roues à réaction.** — Imaginons qu'un vase contenant de l'eau soit disposé de manière à pouvoir tourner très-facilement autour d'une verticale (fig. 453), et qu'il soit muni inférieurement de deux tubes horizontaux par lesquels l'eau puisse s'écouler; supposons de plus que les tubes soient recourbés à leurs extrémités, en sens contraire l'un de l'autre. Aussitôt que l'écoulement se produira, on verra le vase prendre un mouvement de rotation dans le sens opposé à celui dans lequel l'eau sort de chaque tube. Pour se rendre compte de la manière dont ce mouvement se produit, il faut observer que les molécules liquides, animées d'une certaine vitesse à l'intérieur de chacun

eux tubes horizontaux, sont obligées de changer de direc- lorsqu'elles arrivent aux extrémités de ces tubes, en raison forme qu'on leur a donnée; ce changement dans la direc- de la vitesse de chaque molécule ne peut pas s'effectuer qu'elle réagisse sur le tube, en produisant une pression en contraire, et c'est l'ensemble des pressions ainsi détermi- qui fait tourner areil, et qui pour- même lui faire uire une certaine tité de travail. ombre des tubes ontaux d'écoule- pourrait être de 5, etc.; le mou- ent de rotation se uirait toujours de même manière, vu que ces tubes nt tous recourbés un sens convena- leurs extrémités. t appareil est dé- sous le nom d'*ap- l à réaction*. Il a de type à plu- s moteurs hydrau- s, appelés *roues à ion*, qui sont peu loyés, et que nous minerons pas en détail.



Fig. 453.

382. **Turbine Fourneyron.** — Les roues à axe vertical ont , depuis environ trente-cinq ans, de grands perfectionne- ts qui les ont mises au rang des meilleurs moteurs hydrau- s qu'on puisse employer. Ces roues perfectionnées ont reçu m de *turbines*. Nous allons en faire connaître la disposition. première turbine qui ait attiré l'attention générale, par vantages qu'elle présente, et par les bons résultats qu'elle nit sous le rapport de la quantité de travail effectué, est de M. Fourneyron. Voici en quoi elle consiste. L'eau du d'amont A (fig. 454) pénètre librement dans un cylindre B lescend jusqu'au-dessous du niveau du bief d'aval. Ce réser- cylindrique *est fermé* à sa base ; mais il est ouvert latérale-

ment, en C, sur tout son contour : en sorte que, si rien n
opposait, l'eau qui arrive dans le cylindre B s'écoulerait
cette ouverture, en formant une nappe continue qui s'étal

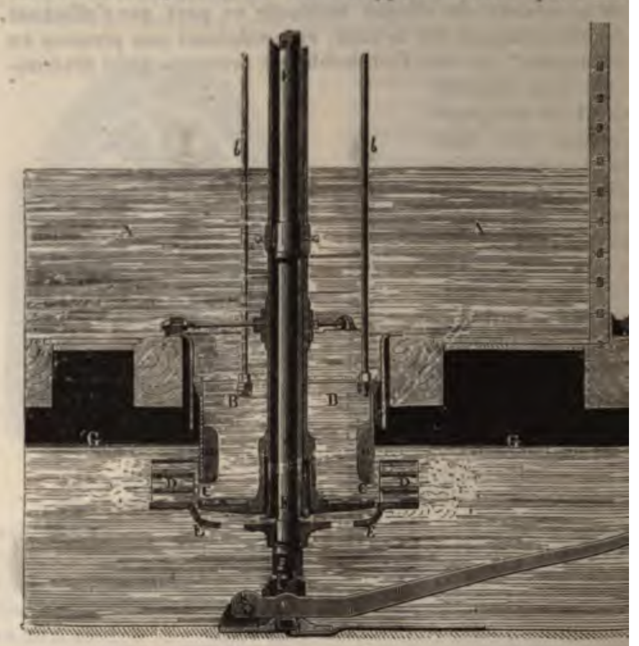


Fig. 454.

dans tous les sens. Une roue annulaire D est disposée hori
talement, tout autour de l'ouverture dont on vient de pa
de manière à se présenter partout sur le passage de la n
d'eau qui s'en échappe. On se fera une idée nette de cette r
en imaginant que ce soit la roue à aubes courbes de la figure
(page 554) qu'on a placée horizontalement, après avoir en
les bras qui relient la couronne à l'arbre, afin que le bas du
servoir B puisse pénétrer à son intérieur. Une sorte de calott
fonte E relie la roue à un arbre central F, qui s'élève vertic
ment, en passant à l'intérieur d'un tuyau disposé au milieu
réservoir B. La roue est tout entière plongée dans l'eau du
d'aval, dont le niveau est en G. L'arbre F se termine inférie
ment par un pivot, qui s'appuie sur un levier HK, mobile au

du point K. Une tige L, articulée à l'extrémité H du levier, se termine à sa partie supérieure par une vis dans laquelle s'engage un écrou ; c'est en faisant tourner cet écrou, qui est d'ailleurs fortement soutenu par des pièces fixes, qu'on peut élever ou abaisser à volonté l'arbre F, avec la roue qu'il porte, de manière à amener la roue à être exactement en regard de l'ouverture C par laquelle l'eau sort du réservoir B.

L'immersion de la roue dans l'eau du bief inférieur n'empêche pas l'eau du réservoir B de sortir par l'ouverture C, pour venir agir sur les aubes dont cette roue est munie sur tout son contour. L'écoulement se produit en vertu de la différence de niveau dans les deux biefs. Si l'eau n'était pas dirigée dans son mouvement à l'intérieur du réservoir B, les molécules liquides sortiraient par les différents points de l'ouverture C, en se mouvant perpendiculairement à la surface latérale de ce réservoir. En pénétrant de cette manière à l'intérieur de la roue, elles agiraient bien sur les aubes courbes, et leur communiqueraient un mouvement de rotation; mais il serait difficile de disposer ces aubes de manière à satisfaire aux conditions générales que doit remplir un bon moteur hydraulique (§ 373). C'est pour cela que M. Fourneyron a disposé à l'intérieur du réservoir B des cloisons courbes, dont on voit la forme sur la figure 455, qui est une coupe horizontale faite dans la machine à la hauteur de la roue. La courbure de ces cloisons est dirigée en sens contraire de celle des aubes de la roue D. Il en résulte que l'eau sort du réservoir B en se mouvant partout obliquement à sa surface; elle vient ainsi rencontrer les aubes, qui s'opposent à la continuation de son mouvement, et exerce sur elle, de tous côtés, des pressions qui font tourner la roue dans le sens indiqué par la flèche.

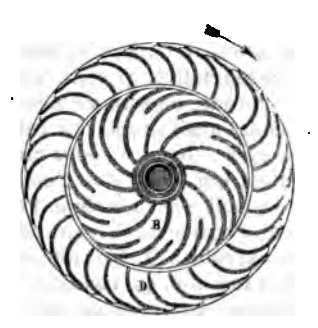


Fig. 455.

Une vanne cylindrique *aa* (fig. 454) existe à l'intérieur du réservoir A, sur tout son contour; cette vanne est destinée à rétrécir plus ou moins l'ouverture C par laquelle l'eau sort de ce réservoir, pour se rendre dans la roue. A cet effet, elle peut être abaissée ou élevée à volonté au moyen de trois tringles verticales *b, b*, munies à leur partie supérieure de filets de vis, dans lesquels s'engagent des *écrous qu'il suffit* de faire tourner ensemble dans

le sens convenable. Les bords inférieurs de cette vanne *aa* présentent une certaine épaisseur, et sont arrondis, afin d'évaser l'orifice de sortie du liquide (§ 289).

Il semble que les aubes courbes de la turbine, qui se présentent à peu près perpendiculairement à la direction du mouvement de l'eau, doivent éprouver un choc de la part du liquide ; et cependant il n'en est rien, lorsque la turbine marche convenablement. Pour s'en rendre compte, il faut observer que les choses ne se passent pas de la même manière que si les aubes étaient immobiles. Par suite du mouvement de la roue, les aubes fuient devant les filets liquides ; elles ne peuvent recevoir d'action de leur part qu'en vertu de la vitesse relative que ces filets liquides possèdent par rapport à elles (§ 324). Or, les aubes sont disposées de manière que, lorsque la turbine aura la vitesse qu'elle doit prendre habituellement, la vitesse relative de l'eau par rapport à la roue soit dirigée suivant la tangente à chaque aube menée par son extrémité intérieure. Il résulte de là que l'eau entre dans la roue sans produire de choc. En se mouvant le long des aubes courbes, de l'intérieur à l'extérieur, elle exerce une pression en chaque point, en raison de ce que sa vitesse change constamment de direction. Enfin elle sort de la roue avec une vitesse relative dirigée en sens contraire du mouvement des aubes; et l'on conçoit que l'on puisse faire prendre à la turbine un mouvement tel que la vitesse de sa circonférence extérieure soit précisément égale à cette vitesse relative. Si cette condition est remplie, l'eau, à sa sortie de la roue, ne sera animée que d'un mouvement insensible, et viendra ainsi se mêler à celle au milieu de laquelle la roue est plongée; elle sera, pour ainsi dire, déposée sans vitesse par les aubes, qui fuient sans l'entraîner.

On voit que la turbine Fourneyron satisfait aussi bien que la roue Poncelet (§ 377) aux conditions générales indiquées dans le paragraphe 373. Mais elle a sur cette dernière roue un avantage bien marqué, qui consiste en ce que l'eau marche sur les aubes, toujours dans le même sens, de l'intérieur à l'extérieur. Dans la roue en dessous à aubes courbes, l'eau entre dans chaque aube, monte le long de sa concavité, puis redescend pour sortir par où elle était entrée ; il en résulte que les diverses portions de la masse d'eau que contient chacune des aubes, n'entrant pas dans la roue exactement à un même instant, se gênent mutuellement dans leur mouvement, tant ascendant que descendant. Dans la turbine Fourneyron, au contraire, les quantités d'eau qui agissent successivement sur une même aube se suivent sans se gêner, en raison de ce qu'elles marchent toujours dans le même sens.

Ajoutons à cela que, l'eau agissant en même temps sur toutes les aubes de la turbine, les pressions horizontales qu'elle exerce sur ces aubes ne tendent à entraîner l'axe de la roue ni d'un côté ni de l'autre; et en conséquence ces pressions ne déterminent aucun frottement de l'arbre sur son pivot, ni sur les corps qu'il touche en divers points de sa hauteur, et qui sont destinés à le maintenir dans une position exactement verticale. Ces circonstances, qui n'auraient pas pu être réalisées dans une roue à axe horizontal, font que la turbine dont il s'agit donne de meilleurs résultats que la roue Poncelet. L'expérience a fait voir que cette turbine utilise les 0,75 du travail moteur que représente la quantité d'eau dépensée, et que même, dans certains cas, elle en utilise les 0,80.

La turbine Fourneyron présente encore d'autres avantages d'une grande importance, que nous allons indiquer. D'abord elle peut fonctionner au milieu de l'eau du bief d'aval, comme le montre la figure 454. Il résulte de cette disposition, qui est généralement adoptée par M. Fourneyron, mais qui n'est pas indispensable : 1° que la machine fonctionne toujours, à l'époque des crues, comme au moment des basses eaux, sans qu'on ait à s'inquiéter de la hauteur plus ou moins grande du niveau de l'eau dans le bief d'aval; 2° que la totalité de la hauteur de chute est utilisée, ce qui n'aurait pas lieu si la roue devait être placée au-dessus du niveau de l'eau dans le bief d'aval; 3° enfin que la machine marche même au moment des fortes gelées, puisque l'eau ne passe à l'état de glace qu'à la surface des cours d'eau.

Un autre avantage de la turbine dont nous nous occupons, avantage qui a été constaté par des expériences nombreuses, consiste en ce qu'on peut faire varier sa vitesse dans des limites assez étendues de part et d'autre de la vitesse qui correspond au maximum d'effet, sans que le rapport du travail utilisé au travail moteur que représente la quantité d'eau employée diminue beaucoup. Ce résultat a une très-grande importance, pour les cas où une turbine doit marcher toujours avec la même vitesse, et où la hauteur de la chute d'eau motrice varie. En effet, la vitesse d'une turbine qui correspond au maximum d'effet dépend de la hauteur de la chute ; elle augmente ou diminue en même temps que cette hauteur. Si la turbine marche toujours avec la même vitesse, sous des hauteurs différentes, elle n'a pas constamment la vitesse capable de produire le maximum d'effet : il est donc très-important que la machine, fonctionnant avec une vitesse différente de cette vitesse particulière, fournisse des résultats qui approchent beaucoup du *maximum* d'effet qu'on pourrait en obtenir.

Enfin la turbine Fourneyron peut être adaptée à toute espèce de chute, pourvu qu'on la dispose en conséquence, suivant la quantité d'eau plus ou moins grande qui doit agir sur elle, et la rapidité du mouvement qu'elle doit prendre. Pour qu'il ne reste pas de doute à ce sujet, il suffit de citer deux exemples. M. Fourneyron a établi à Saint-Blaise, dans la forêt Noire, une turbine qui est mise en mouvement par une chute de 108 mètres de hauteur ; cette turbine, dont le diamètre n'est que de $0^m,55$ fait 2 300 tours par minute, et a une force de 40 chevaux-vapeur : elle utilise les 0,75 de la force de la chute. D'un autre côté, dans des expériences faites sur une turbine établie à Gisors, on a trouvé que, sous une chute de $1^m,15$, la machine utilisait les 0,75 du travail développé par la chute ; que sous une chute de $0^m,62$, elle en utilisait les 0,66 ; et enfin que sous une chute de $0^m,31$, elle en utilisait encore les 0,60. Aucune des roues hydrauliques connues n'aurait pu produire d'aussi bons résultats, dans ces circonstances exceptionnelles.

§ 383. **Turbine Callon.** — Au milieu de tous les avantages que nous venons de signaler dans la turbine Fourneyron, il existe un inconvénient qui fait qu'elle n'utilise pas toujours une aussi grande portion du travail développé par la chute. Nous avons dit que l'ouverture par laquelle l'eau sort du réservoir, pour se rendre dans la roue, peut être rétrécie plus ou moins, dans le sens de la hauteur, au moyen d'une vanne cylindrique, qui règne tout autour du réservoir, et que l'on peut élever ou abaisser à volonté. On donne à cette vanne une position ou une autre, suivant qu'on a une quantité d'eau plus ou moins grande à dépenser. La nappe d'eau qui s'échappe du réservoir, sur tout son contour, pour pénétrer dans la roue, a donc une épaisseur plus ou moins grande, suivant les cas ; et, en conséquence, elle ne remplit pas toujours la roue dans toute sa hauteur. La partie supérieure de l'espace compris entre les aubes de la roue ne reste cependant pas vide ; mais l'eau qui s'y trouve ne possède pas la vitesse de celle qui sort du réservoir ; et cela occasionne des remous, accompagnés de pertes de vitesse, qui déterminent une diminution dans l'effet utile. C'est pour cela que M. Fourneyron divise sa roue en plusieurs compartiments dans le sens de sa hauteur, au moyen de cloisons horizontales que l'on voit sur la figure 454. Mais ces cloisons ne font pas disparaître complétement l'inconvénient qui vient d'être signalé.

M. Ch. Callon a imaginé un autre moyen de faire varier la quantité d'eau dépensée par la turbine. Ce moyen consiste à remplacer la vanne unique de M. Fourneyron par un grand nombre de van-

nes partielles, correspondant aux différentes portions de l'ouverture par laquelle l'eau passe du réservoir dans la roue. A l'aide de cette modification, on conçoit que l'on puisse diminuer la quantité d'eau qui sort du réservoir, sans diminuer l'épaisseur de la lame d'eau ; il suffit, en effet, de fermer complétement quelques-unes des vannes partielles, prises régulièrement dans tout le contour du réservoir, et de laisser les autres entièrement ouvertes. L'inconvénient qui se présentait dans la turbine Fourneyron ne se rencontre plus dans celle de M. Callon ; mais il est remplacé par un autre, qui consiste en ce que les diverses portions de la roue passent successivement devant des vannes ouvertes et devant des vannes fermées. Au moment où l'intervalle de deux aubes arrive en regard d'une vanne fermée, l'eau qui y est contenue, et qui est animée d'une vitesse assez grande, ne peut continuer à se mouvoir qu'en produisant un vide derrière elle, ce qui occasionne une diminution brusque dans sa vitesse, et par suite entraîne une perte de travail.

§ 384. **Turbine Fontaine.** — M. Fontaine, de Chartres, a donné à la turbine une disposition différente de celle qu'avait adoptée M. Fourneyron. Au lieu de faire descendre l'eau motrice dans un cylindre qui pénètre jusqu'au milieu de la roue, pour la faire sortir sur tout son contour, et la faire marcher dans la roue de l'intérieur à l'extérieur, il a imaginé de faire sortir l'eau du réservoir A (fig. 456), par une ouverture annulaire BB pratiquée dans son fond, et de la faire agir de haut en bas dans la roue CC, qui se trouve placée au-dessous de cette ouverture annulaire. La roue est reliée, par une sorte de calotte de fonte EE, à un arbre vertical FF auquel elle communique son mouvement de rotation. Cet arbre est creux, et enveloppe un arbre GG qui est solidement appuyé au fond du bief inférieur. Ce dernier arbre ne tourne pas avec la roue ; mais il supporte en *o*, sur sa tête qui forme crapaudine, un pivot fixé à l'arbre FF de la roue. Par cette disposition, la turbine est pour ainsi dire suspendue ; et le pivot se trouvant hors de l'eau, on peut l'entretenir facilement dans un état convenable pour éviter les frottements et l'usure.

L'ouverture BB, par laquelle l'eau sort du réservoir pour entrer dans la roue, est divisée, dans tout son contour, en un grand nombre d'orifices distincts, par des cloisons courbes destinées à diriger l'eau dans son mouvement. Chacun de ces orifices est muni d'une vanne spéciale à l'aide de laquelle on peut le fermer plus ou moins. Une couronne *aa* réunit les extrémités supérieures des tiges *b*, *b*, de ces diverses vannes ; cette couronne est d'ailleurs soutenue par des tringles *c*, *c*, à l'aide desquelles on peut la

faire monter ou descendre, ce qui fait varier en même temps la grandeur des ouvertures par lesquelles l'eau peut s'écouler. La figure 457 montre la disposition des vannes *d*, *d*, qui sont arrondies pour éviter les pertes de vitesse dues aux changements brusques de direction des filets liquides; *e*, *e*, sont les cloisons courbes qui dirigent l'eau à sa sortie; *f*, *f*, sont les aubes de la turbine, qui sont également courbes, mais dirigées en sens contraire des courbes directrices *e*, *e*.

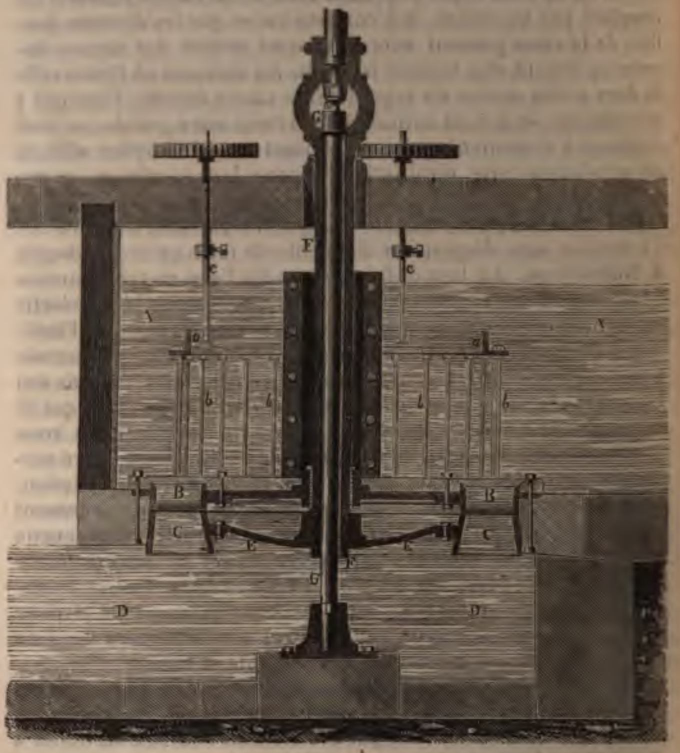


Fig. 456.

La disposition que M. Fontaine a donnée à ses vannes fait disparaître en grande partie l'inconvénient que nous avons signalé dans la turbine Fourneyron, et qui fait que le rendement de la

machine diminue lorsqu'on ne lui fournit pas toute l'eau qu'elle est capable de dépenser. Les deux espèces de turbines donnent d'ailleurs d'aussi bons résultats l'une que l'autre, lorsque les vannes sont suffisamment ouvertes.

§ 385. **Turbine Kœchlin.** — Les turbines dont nous venons de parler sont placées d'une manière incommode pour les réparations qu'on peut avoir à faire. On ne peut atteindre la roue qu'autant que, par un moyen quelconque, on est parvenu à abaisser notablement le niveau de l'eau dans le bief inférieur, soit que la roue soit complétement immergée dans ce bief, soit qu'elle se trouve au-dessus de son niveau, mais à une petite distance. Pour cela on établit ordinairement un barrage momentané, qui isole la portion de ce bief où se trouve la roue de tout le reste du cours d'eau; puis, en agissant au moyen de pompes, on enlève l'eau qui y est contenue.



Fig. 457.

La turbine Kœchlin, qui a été imaginée par M. Jonval, et qui a été construite et perfectionnée par MM. A. Kœchlin de Mulhouse, présente une disposition particulière, qui a pour objet de faire disparaître les difficultés de visites et de réparations que nous venons de signaler dans les autres turbines. Voici quel en est le principe. Concevons que l'eau soit amenée du bief d'amont dans le bief d'aval par un cylindre vertical qui débouche dans l'un et dans l'autre de ces deux biefs, on pourra utiliser le travail développé par le passage de l'eau dans ce cylindre, en installant à sa partie inférieure une turbine telle que celles que nous avons décrites. Mais, au lieu de mettre la turbine au bas de cette chute, on peut aussi l'installer en un point quelconque de la hauteur du cylindre, pourvu que l'eau, en quittant la roue, et parcourant ensuite la portion de ce cylindre qui existe entre elle et le bief d'aval, ne soit mise en communication directe avec l'atmosphère qu'après qu'elle est arrivée dans le bief. On voit, en effet, que si l'on perd de la force en plaçant la turbine *plus haut, en raison* de ce que la hauteur du niveau du bief

d'amont au-dessus de la roue est plus petite, d'un autre côté on gagne par l'aspiration qui se produit dans la partie du cylindre située au-dessous de la roue, aspiration qui est d'autant pl forte que la roue est à une plus grande distance du niveau l'eau dans le bief d'aval. On comprend maintenant que la p sition que l'on donnera ainsi à la machine permettra de la siter et de la réparer beaucoup plus facilement ; car il suffira ne plus laisser arriver l'eau motrice dans le cylindre qui co tient la turbine, pour que ce cylindre se vide complétement, que la roue soit ainsi mise à sec.

La turbine Kœchlin, dans laquelle l'eau agit de haut en b comme dans la turbine Fontaine, et non horizontalement comm dans les autres machines de ce genre, fournit d'ailleurs de tr bons résultats, lorsqu'elle fonctionne dans les circonstances po lesquelles elle a été établie.

§ 386. **Turbines hydropneumatiques.** — Nous avons sign les avantages que présentent les turbines de pouvoir march sous l'eau, avantages dont le plus important est d'utiliser la talité de la hauteur de chute, quels que soient les changeme de position du niveau d'aval. Mais nous avons vu qu'il en résu un inconvénient notable, dans le cas où la turbine ne déper pas toute l'eau pour laquelle elle a été construite. Si l'eau s du réservoir à la fois par tous les orifices, que l'on rétrécit pl ou moins, suivant la quantité d'eau à dépenser, comme dans turbines Fourneyron et Fontaine, elle ne remplit pas tout l'e pace compris entre les aubes de la roue, le reste de cet espa est occupé par de l'eau du bief d'aval, qui ne fait que tourn avec la roue, et dont la présence occasionne des remous acco pagnés de pertes de travail. Si un certain nombre des orifices sortie du réservoir ont été fermés, tandis que les autres so restés entièrement ouverts, comme dans la turbine Callon, l' tervalle des aubes de la roue se remplit bien complétement lo qu'il passe devant un orifice ouvert ; mais lorsque cet interval en tournant, vient à passer devant un orifice fermé, l'eau éprouve un ralentissement brusque, par suite du vide que s mouvement tend à produire derrière elle. Ces inconvénients se présenteraient pas si la turbine marchait hors de l'eau, et elle était disposée de manière que l'intervalle de ses aubes fût jamais complétement rempli par l'eau qui s'y introduit su cessivement ; le reste de cet espace serait occupé par de l'a qui communiquerait librement avec l'air extérieur, et dont présence ne gênerait en rien la marche de l'eau dans la con vité des aubes courbes.

Pour réunir à la fois les avantages de la marche sous l'eau, et ceux de la marche dans l'air, M. L.-D. Girard a eu l'idée de faire marcher les turbines dans l'air comprimé. Concevons qu'une turbine soit installée au-dessous du niveau d'aval, et qu'elle soit entièrement recouverte d'une espèce de cloche qui plonge dans l'eau, et dont les bords se trouvent un peu plus bas que la partie inférieure de la roue. Si l'on foule de l'air dans cette cloche, le niveau de l'eau s'y abaissera de plus en plus, mais à partir du moment où ce niveau se sera abaissé jusqu'aux bords de la cloche, les nouvelles quantités d'air introduites ne le feront pas baisser davantage ; l'air excédant s'échappera par le bas de la cloche, et remontera dans l'atmosphère en traversant l'eau du bief d'aval. A l'aide de cette disposition, la roue ne sera pas noyée; elle se trouvera à une petite distance au-dessus du niveau de l'eau environnante, et elle sera toujours placée de même par rapport à ce niveau, quelle que soit la hauteur de l'eau dans le bief d'aval. Tel est le principe des *turbines hydropneumatiques.*

On se rend facilement compte de la manière dont l'eau agit dans une pareille turbine, en se reportant à ce qui a été dit sur l'écoulement d'un liquide par un orifice, lorsque la pression est plus grande à l'orifice que sur la surface libre du liquide dans le réservoir (§ 286). Si le niveau du bief d'aval est situé à 3 décimètres au-dessus des bords de la cloche qui contient la turbine, l'excès de la pression de l'air renfermé dans cette cloche sur l'air extérieur sera mesuré par une colonne d'eau de 3 décimètres de hauteur. Donc l'écoulement de l'eau du réservoir dans la turbine, et par conséquent dans l'air comprimé de la cloche, s'effectuera de la même manière que si cet air n'était pas comprimé, et que le niveau de l'eau du bief d'amont fût plus bas de 3 décimètres. Ainsi l'écoulement du liquide sera toujours dû à la hauteur de chute, c'est-à-dire à la différence de niveau des biefs d'amont et d'aval. L'emploi de la cloche à air comprimé amène donc le même résultat que si, en laissant la roue où elle est installée, on abaissait à la fois les biefs d'amont et d'aval d'une même quantité, de manière à placer le niveau du dernier immédiatement au-dessous de la roue. On voit par là qu'une turbine hydropneumatique réunit l'avantage de marcher dans l'air à celui d'utiliser autant que possible la totalité de la hauteur de chute.

Dans la construction des turbines hydropneumatiques, on n'a pas besoin d'adopter des dimensions telles que l'intervalle des aubes de la roue soit complétement plein de liquide, lorsque la turbine dépense la plus grande quantité d'eau qu'on puisse lui

donner. Il vaut même mieux qu'une partie de cet intervalle soit toujours occupée par de l'air communiquant librement avec l'air environnant, et que l'eau ne fasse que s'étaler en nappe dans la concavité de chaque aube. C'est ce qui fait que, lorsqu'on n'a qu'une petite quantité d'eau à dépenser, on peut donner à la roue des dimensions plus grandes que celles qu'on lui aurait données sans cela, et que, par conséquent, on peut la faire tourner moins rapidement, ce qui est un avantage réel. L'emploi des vannes partielles de M. Ch. Callon, appliquées soit aux turbines Fourneyron, soit aux turbines Fontaine, est alors préférable à la disposition qui consiste à rétrécir plus ou moins les orifices par lesquels l'eau passe du réservoir dans la roue en n'en fermant aucun complétement. L'expérience a prouvé que les turbines établies de cette manière utilisent sensiblement la même fraction de la force de la chute (0,75), quelle que soit la quantité d'eau dépensée, ce qui est un résultat des plus importants.

Il ne reste plus qu'à indiquer de quelle manière on maintient une atmosphère d'air comprimé dans la cloche qui recouvre la roue. On y parvient au moyen d'une pompe foulante à air, que la turbine elle-même fait mouvoir pendant tout le temps qu'elle marche. Les nouvelles quantités d'air introduites ainsi constamment dans la cloche compensent les pertes qui proviennent, soit des fuites qui peuvent exister, soit de ce que l'eau entraîne de l'air avec elle ; mais la pompe en fournit toujours un excès qui s'échappe en passant sous les bords de la cloche, de sorte qu'on est sûr que le niveau de l'eau près de la turbine correspond toujours à ces bords.

M. Girard a proposé d'appliquer le même système aux roues hydrauliques à axe horizontal, afin de les empêcher d'être noyées au moment des crues.

§ 387. **Considérations générales sur l'établissement d'une roue hydraulique.** — Lorsqu'on veut établir une roue hydraulique, pour utiliser la force d'une chute d'eau, il faut d'abord choisir parmi les diverses espèces de roues, celle qui convient le mieux aux circonstances dans lesquelles on est placé. Des raisons de diverses natures peuvent entrer en considération pour le choix qu'on a à faire. La simplicité plus ou moins grande de la roue et des constructions que nécessitera son établissement ; la facilité des réparations qu'on a besoin de faire de temps en temps à des machines de ce genre ; la nature de la chute, et les variations que sa force éprouve aux diverses époques de l'année ; le besoin plus ou moins grand qu'on a d'utiliser le mieux possible la force de cette chute, sont autant de

motifs qui conduiront à faire adopter tel ou tel système de moteur.

Lorsqu'on aura fait son choix, on saura quelle fraction de la force de la chute sera utilisée par la roue qu'on aura adoptée. Ce sera, par exemple, les 0,75 de cette force, s'il s'agit d'une roue à augets ou d'une turbine; ou les 0,56, si c'est une roue en dessous, à aubes courbes; ou bien encore les 0,25, si c'est une roue en dessous, à aubes planes.

On pourra donc, d'après la connaissance qu'on a de la force de la chute, calculer le nombre de chevaux-vapeur qui représentera la force de la roue, et régler d'après cela le nombre et les dimensions des machines spéciales destinées à la production du travail utile, machines qui seront, ou des pompes destinées à élever de l'eau à une certaine hauteur, ou des moulins à farine, ou des métiers à filer, etc. Pour cela on aura besoin d'emprunter à l'expérience la connaissance de la quantité de chacun de ces travaux qui peut être effectué par la force d'un cheval-vapeur.

La hauteur de la chute, et la nature de la roue qu'on adopte, déterminent le nombre de tours que cette roue doit faire dans un temps donné pour produire le maximum d'effet. On devra, en conséquence, établir entre l'arbre de la roue et les mécanismes qu'elle doit faire mouvoir une liaison telle, que ces mécanismes marchent avec la vitesse la plus convenable au travail qu'ils effectuent, lorsque la roue prendra ce mouvement particulier qui lui permet d'utiliser la plus grande fraction possible du travail développé par la chute. On se servira, pour cela, soit d'engrenages (§ 58), soit de courroies sans fin (§ 57).

Enfin, d'après la connaissance de la vitesse que doit prendre la roue, et de la quantité d'eau que lui fournira la chute dans un temps donné, on déterminera les dimensions des aubes ou augets sur lesquels le liquide doit agir.

Lorsque la roue sera construite et installée, et qu'elle aura été mise en communication avec les machines spéciales qu'elle doit faire mouvoir, il ne s'agira plus que d'ouvrir les vannes qui permettent à l'eau motrice de sortir du bief supérieur, pour qu'elle vienne exercer son action sur la roue et la mettre en mouvement. Si l'on donne à la roue une quantité d'eau de plus en plus grande, il est clair qu'elle prendra un mouvement de plus en plus rapide. On conçoit donc que l'on puisse de cette manière lui donner la vitesse qui convient à son maximum d'effet; et si les données l'expérience sur lesquelles on s'est fondé pour son établissement sont bien exactes, on devra dépenser ainsi précisément la quantité d'eau que la chute est capable de fournir sans interruption.

§ 388. **Machine à colonne d'eau à simple effet.** — Les roues hydrauliques sont les machines dont on se sert dans la plupart des cas pour utiliser la force d'une chute d'eau; cependant il y a des circonstances exceptionnelles dans lesquelles on a recours à d'autres moyens. Lorsqu'on a à sa disposition une chute d'une grande hauteur, qui ne fournit qu'une petite quantité d'eau, on peut profiter de cette chute pour donner un mouvement de va-et-vient à un piston qui se meut dans un corps de pompe: ce mouvement de va-et-vient, en se transmettant ensuite à divers mécanismes, déterminera la production d'une certaine quantité de travail utile.

Les machines motrices, dans lesquelles la force de l'eau est ainsi appliquée à un piston, qui, en raison de cette action, se meut tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, sont désignées sous le nom de *machines à colonne d'eau*. La machine est *à simple effet*, lorsque l'eau ne fait mouvoir le piston que dans un sens, et que son mouvement en sens contraire est déterminé par son propre poids, ou par le poids des diverses pièces qui lui sont fixées; elle est *à double effet*, lorsque l'eau agit constamment sur le piston, soit pour le pousser dans un sens, soit pour le faire mouvoir en sens contraire.

Nous prendrons, comme exemple de machine à colonne d'eau à simple effet, les belles machines que M. Juncker a établies dans la mine de Huelgoat, en Bretagne. La figure 458 en est une coupe qui montre tous les détails de leur disposition. Un piston A est installé dans un cylindre BB qu'il peut parcourir dans toute sa longueur. Ce cylindre est ouvert par le haut et fermé par le bas; son fond est traversé par la tige du piston A. L'eau qui doit faire mouvoir la machine, et qui doit agir sur le piston A par la pression due à la hauteur de la chute, est amenée par un tuyau C, qui part du réservoir supérieur et vient aboutir à la machine même. Une ouverture D, pratiquée au bas du cylindre BB, permet à l'eau motrice de pénétrer dans ce cylindre, de presser le piston A de bas en haut, et de le faire monter à l'intérieur du cylindre; cette même ouverture laisse écouler l'eau contenue dans le cylindre BB, et par suite permet au piston A de descendre, lorsqu'on supprime sa communication avec le tuyau C, et qu'on la fait communiquer librement avec l'atmosphère.

Pour que le piston A puisse prendre un mouvement de va-et-vient dans le cylindre BB, il faut donc que l'ouverture D soit alternativement mise en communication avec le tuyau des eaux motrices C et avec l'atmosphère; c'est à cela qu'est destiné l'appareil régulateur que l'on voit à gauche du cylindre BB. Cet appa-

reil se compose essentiellement de deux pistons E, F, montés sur une même tige, et pouvant se mouvoir ensemble dans le cylindre qui les contient. Ces deux pistons occupent, sur la figure 458, la position la plus basse qu'ils puissent prendre ; la figure 459, qui reproduit l'appareil régulateur seul, les montre au contraire dans leur position la plus élevée. Dans l'une ou dans l'autre de ces deux positions, l'eau motrice, qui vient par le tuyau C, communique toujours avec l'espace compris entre les deux pistons E, F. Mais dans la première (fig. 458), le piston E est au-dessous de l'ouverture D, et par conséquent l'eau motrice peut venir presser le piston A et le faire monter; tandis que dans la seconde (fig. 459), le piston E intercepte le passage de l'eau motrice, et permet, au contraire, à l'eau qui s'est introduite sous le piston A, en le soulevant, de s'écouler par un tuyau de décharge G, et de laisser redescendre le piston. Reste donc à faire voir comment les deux pistons E, F, reçoivent un mouvement de va-et-vient, en vertu duquel l'ouverture D est alternativement en communication avec le tuyau C et avec le tuyau G.

Le piston F est un peu plus large que le piston E. L'eau motrice, qui arrive toujours librement entre eux, exerce donc une plus grande pression sur la face inférieure du premier que sur la face supérieure du second; et, en conséquence, les deux pistons tendent constamment à monter, en vertu de la différence de ces deux pressions. C'est ce qui arrive en effet, tant qu'une autre action ne vient pas se combiner avec celles que nous venons de signaler, et c'est ainsi que les pistons E, F, passent de la position indiquée par la figure 458 à celle de la figure 459. Pour produire le mouvement contraire, on a adapté au cylindre dans lequel se meuvent les pistons E, F, un petit tuyau H, qui se relève et communique avec le dessus du piston F, par la petite ouverture I. L'eau motrice, en passant par ces conduits, vient exercer sa pression sur la tête du piston F : et, pour que la pression ainsi produite ne soit pas trop grande, on a surmonté le piston F d'un manchon cylindrique qui traverse le fond supérieur du cylindre; en sorte que l'eau amenée par l'ouverture I ne presse ce piston que sur la surface annulaire qui entoure ce manchon. Un mécanisme particulier, dont nous allons parler, met l'ouverture I alternativement en communication avec le tuyau H, qui amène l'eau motrice, et avec le tuyau MM qui aboutit au tuyau de décharge G. Dans le premier cas, la pression que l'eau motrice exerce sur la face supérieure du piston F, tout autour du manchon qui le surmonte, l'emporte sur la résultante des pressions que cette même eau exerce sur la face inférieure du *piston F et sur* la face supérieure du piston E; et

ces deux pistons descendent. Dans le second cas, l'eau qui se trouve au-dessus du piston F communiquant avec le tuyau de décharge G, la différence des pressions de l'eau motrice sur la

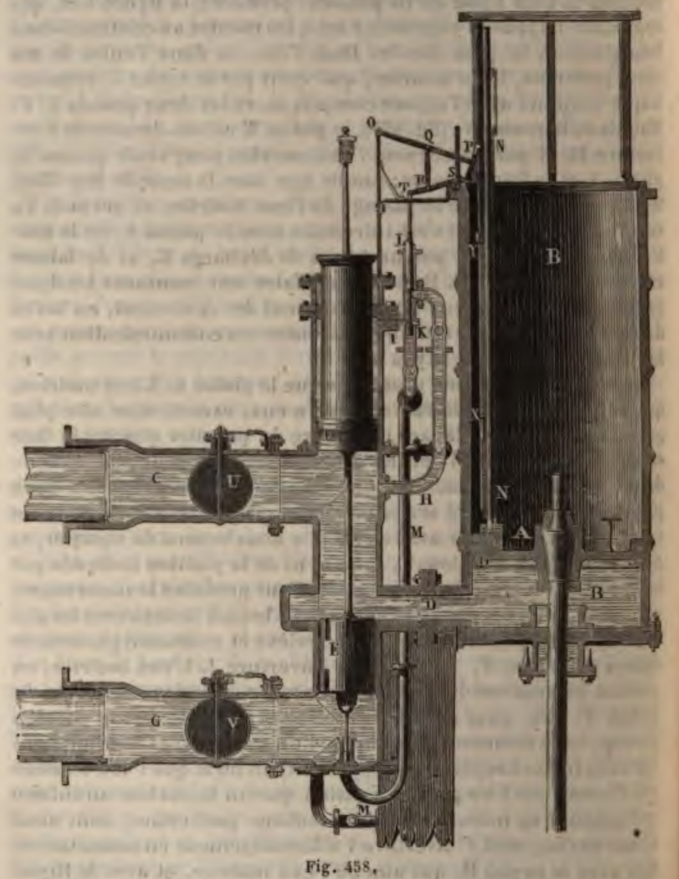


Fig. 458.

face inférieure du piston F et sur la face supérieure du piston E fait remonter ces deux pistons.

Deux petits pistons K, L, se trouvent dans un petit cylindre situé entre le tuyau H et l'ouverture I. Un mouvement de va-et-vient de s deux pistons amène le piston K, tantôt au-dessous de l'ouver-

ture I (fig. 458), tantôt au-dessus de cette ouverture (fig. 459); et c'est ce qui fait communiquer le dessus du piston F, soit avec l'eau motrice, par le tuyau H, soit avec le tuyau de décharge, par le conduit MM. Ce mouvement de va-et-vient des petits pistons K, L, est produit par le piston A lui-même. A cet effet il est surmonté d'une tige NN, qui agit, à la fin de chaque course ascendante ou descendante, sur un levier OP, mobile autour du point O. Une tringle QR, articulée en Q à ce levier, transmet son mouvement à un second levier ST, mobile autour du point S, auquel elle est articulée en R. La tige des deux pistons K, L, est articulée en T, à l'extrémité de ce levier ST. Le levier OP se termine par un arc P, qui porte deux petites cames à ses extrémités. La tige NN, qui monte et descend avec le piston A, est d'ailleurs munie de deux petits taquets X, Y, fixés, l'un sur sa face antérieure, l'autre sur sa face postérieure; ces taquets viennent, chacun à son tour, rencontrer une des cames de l'arc P, et mettre ainsi en mouvement les deux leviers OP, ST, et les pistons K, L.



Fig. 459.

La figure 458 montre la machine dans la position qu'occupent les diverses pièces, pendant que le piston A monte sous l'action de l'eau motrice; les pistons K, L, sont au bas de leur course; l'eau motrice, en arrivant par le tuyau H et par l'ouverture I, presse sur la face supérieure du piston F, et maintient ainsi les deux pistons E, F, également au bas de leur course; le piston A est donc soumis à l'action de la colonne d'eau qui arrive librement de C en D, et il s'élève tant que les pistons E, F, ne changent pas de place. Lorsque le piston A arrive vers le haut de sa course, le taquet X saisit la came que porte l'extrémité supérieure de l'arc P, et soulève cet arc, en faisant tourner le levier OP autour du point O : le levier ST tourne en même temps autour du point S, et les deux pistons K, L, sont amenés à la partie supérieure de leur course (fig. 459). Dès lors l'eau qui surmonte le piston F

n'éprouve plus la pression de l'eau motrice, puisqu'elle communique avec le tuyau MM ; les pistons E, F, remontent; l'eau qui se trouve sous le piston A est mise en communication avec le tuyau de décharge G; et ce piston redescend en vertu de son poids et du poids des pièces qui font corps avec lui. Lorsque le piston A arrive vers le bas du cylindre BB, le taquet Y saisit la came inférieure de l'arc P, et, en l'abaissant, elle ramène le levier OP dans la position qu'il occupait d'abord (fig. 458); les pistons K, L, sont ainsi ramenés en même temps au bas de leur course. L'eau motrice, pouvant passer de H en I, vient agir sur la tête du piston F, et détermine l'abaissement des deux pistons E, F; le tuyau C est donc de nouveau mis en communication avec le bas du cylindre BB, le piston A remonte, et ainsi de suite. On voit donc que, dès le moment que la machine a commencé à se mouvoir, elle se suffit à elle-même, et continue indéfiniment à marcher, sans qu'on ait besoin de s'en occuper.

Pour modérer la marche de la machine, on a placé deux soupapes à gorge U, V, dans les tuyaux C, G. En tournant ces soupapes d'une quantité plus ou moins grande, on produit des étranglements qui ralentissent la marche du piston A (§ 301) soit lorsqu'il monte, soit lorsqu'il descend, et l'on peut ainsi faire en sorte qu'il prenne telle vitesse que l'on veut. Les positions que l'on donne aux taquets X, Y, sur la tige NN, règlent d'ailleurs l'étendue de la course du piston. Pour arrêter la machine, il suffit de fermer deux robinets qui sont installés, l'un sur le tuyau H, l'autre sur le tuyau M ; cette simple opération fait que les pistons E, F, ne peuvent plus ni monter ni descendre : ils s'arrêtent à l'endroit où ils se trouvent au moment où l'on ferme ces deux robinets. On peut même reconnaître sans peine que la fermeture d'un seul de ces robinets suffit. Si, après avoir arrêté la machine pendant un temps plus ou moins long, on vient à ouvrir les robinets qu'on avait fermés, la machine se remet en marche d'elle même, et reprend son mouvement au point où on l'avait suspendu.

Les cannelures que l'on voit vers le haut et vers le bas du piston E sont destinées à empêcher que la communication de l'ouverture D avec le tuyau de l'eau motrice C, et avec le tuyau de décharge G, ne soit établie et interrompue trop brusquement, ce qui occasionnerait des chocs et pourrait détériorer promptement la machine. Lorsque le piston E passe devant l'ouverture D, en s'abaissant, l'eau motrice commence par communiquer avec cette ouverture par les cannelures supérieures : le passage qui est ainsi offert à cette eau s'agrandit de plus en plus, en raison de ce que la

profondeur des cannelures va en augmentant depuis leur origine jusqu'à la base du piston : en sorte que la communication de l'eau motrice avec l'ouverture D s'établit ainsi progressivement jusqu'à ce que cette ouverture soit complétement démasquée. Il en est de même pour la communication de l'ouverture D avec le tuyau de décharge, lorsque le piston E remonte.

Lorsque le piston E passe devant l'ouverture D, il éprouve une forte pression latérale de la part de l'eau qui y est contenue. Pour que cette pression ne l'applique pas fortement contre la paroi du cylindre dans lequel il se meut, ce qui donnerait lieu à un frottement considérable, on a évidé ce cylindre, dans tout son contour, en regard de l'ouverture D. De cette manière, l'eau contenue en D se répand librement tout autour du piston E; elle exerce également sa pression sur tout son contour, et il en résulte qu'il n'est appuyé ni d'un côté ni de l'autre sur la paroi du cylindre dans lequel il est engagé : il se meut sans éprouver plus de frottement sur cette paroi que s'il n'était pas soumis à la pression dont nous parlons.

Deux machines, entièrement pareilles à celles que nous venons de décrire, sont installées l'une à côté de l'autre, dans la mine de plomb argentifère de Huelgoat. Elles sont mises en mouvement par une chute d'eau de 60 mètres de hauteur. Le piston moteur A de chacune d'elles est lié à une longue tige qui traverse le fond du cylindre BB, et descend verticalement dans un puits, pour y faire mouvoir une pompe d'épuisement. Cette pompe élève d'un seul jet l'eau du puits à une hauteur verticale de 230 mètres. C'est lorsque le piston A monte dans le cylindre BB, que l'eau de la mine est refoulée par la pompe dans le tuyau d'ascension, à cette hauteur prodigieuse. Pendant que ce piston moteur redescend, avec la longue tige qui le relie au piston de la pompe d'épuisement, il n'a aucune résistance utile à vaincre; aussi a-t-on employé un moyen particulier pour équilibrer en grande partie le poids de tout cet appareil, afin d'éviter la trop grande rapidité de sa descente, et les inconvénients graves qu'elle aurait pu entraîner. Au lieu de placer le cylindre BB au niveau de la galerie souterraine par laquelle devaient s'écouler les eaux provenant de la pompe d'épuisement et du tuyau de décharge G, on l'a installé à 14 mètres en contre-bas de cette galerie. La hauteur de la colonne d'eau motrice se trouve donc portée ainsi à 74 mètres; et l'eau, après avoir soulevé le piston moteur A, ne peut être expulsée par lui du cylindre BB, pendant qu'il descend, qu'autant qu'il la fait remonter à une hauteur de 14 mètres, par le tuyau de décharge G. Cette élévation de l'eau

qui a agi dans la machine est une résistance que le piston doit vaincre en descendant, et qui a été calculée de manière à modérer convenablement son mouvement. Elle ne doit pas être assimilée à une résistance entièrement inutile, telle que celle déterminée par une soupape à gorge, qui rétrécit plus ou moins le passage de l'eau, et diminue ainsi sa vitesse : car son emploi a donné lieu à une augmentation correspondante dans la puissance de la colonne d'eau motrice.

Les belles machines de Huelgoat, qui fonctionnent avec une douceur et une régularité parfaites, utilisent près des deux tiers du travail moteur développé par la chute.

§ 389. **Machine à colonne d'eau à double effet.** — La disposition de la machine à colonne d'eau à double effet a beaucoup d'analogie avec celle de la machine à simple effet. Il n'y a de différence essentielle qu'en ce que le piston A (fig. 460) se meut dans un cylindre BB fermé à ses deux extrémités, et en ce que l'appareil régulateur, au lieu de ne faire communiquer alternativement le tuyau de l'eau motrice et le tuyau de décharge qu'avec le bas du cylindre, établit ces communications alternatives à la fois avec la partie supérieure et avec la partie inférieure, par les ouvertures C, D. C'est par le tuyau vertical E qu'arrive l'eau motrice; ce tuyau s'embranche avec deux tuyaux F, G, dont le premier amène l'eau à l'ouverture C, et le second à l'ouverture D. Deux pistons H, K, fixés à une même tige, peuvent se mouvoir dans un petit cylindre placé à côté du cylindre principal BB. Dans la position actuelle de ces deux pistons, l'eau motrice arrive dans la partie inférieure du cylindre BB, en passant par le tuyau G et par l'ouverture D; elle exerce donc sur la face inférieure du piston A une pression qui est dirigée de bas en haut. En même temps l'eau qui se trouve au-dessus du piston A communique librement, par l'ouverture C, avec le tuyau de décharge L. Le piston A, étant plus pressé sur sa face inférieure que sur sa face supérieure, prend un mouvement ascendant; l'eau qui le surmonte sort par le tuyau L, et tombe dans une caisse M, qui communique avec le canal destiné à son écoulement. Concevons maintenant qu'au moment où le piston A atteint l'extrémité supérieure du cylindre BB, les deux pistons H, K, s'abaissent, de manière à se placer respectivement au-dessous des ouvertures C, D; l'ouverture C communiquera avec l'eau motrice, par le tuyau F, et l'ouverture D avec le tuyau de décharge L : le piston A redescendra donc, en faisant sortir par ce tuyau de décharge toute l'eau qui s'était introduite sous lui. Si les pistons A, K reprennent leur première position, lorsque le piston A sera arrivé au

bas de sa course, l'eau motrice, agissant par l'ouverture D, le fera remonter; et ainsi de suite.

On voit donc que, pour établir alternativement les communications des ouvertures C, D, avec le tuyau de l'eau motrice E, et avec le tuyau de décharge L, il suffit de faire descendre les deux

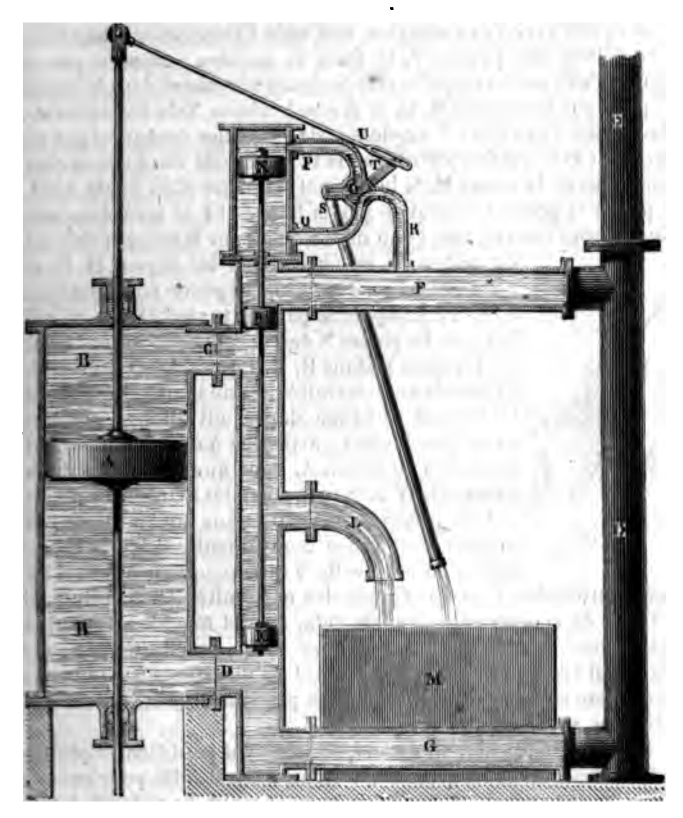


Fig. 460.

pistons H, K, lorsque le piston A est au haut de sa course, et de les faire remonter, lorsqu'il est arrivé au bas. Ce mouvement alternatif et intermittent des pistons H, K, est produit au moyen

d'un piston N qui est adapté à l'extrémité de la tige de ces deux pistons, et qui peut se mouvoir dans un cylindre spécial placé au-dessus de celui où se trouvent les pistons H, K. Un robinet O, qui prend deux positions différentes, suivant que le piston A arrive au haut ou au bas de sa course, fait communiquer alternativement la partie inférieure et la partie supérieure de ce petit cylindre, soit avec l'eau motrice, soit avec l'atmosphère, par l'intermédiaire des tuyaux P, Q. Dans la position indiquée par la figure, l'eau motrice, qui arrive toujours librement dans le tuyau F, passe par les tuyaux R, Q, et presse le piston N de bas en haut; tandis que l'eau qui est au-dessus de ce piston communique librement avec l'atmosphère, par le tuyau S, qui vient déboucher au-dessus de la caisse M. Si le robinet O tourne d'un angle droit, il prend la position indiquée par la figure 461, et les communications sont interverties, l'eau motrice agit sur la face supérieure du piston N, en passant par les tuyaux R, P, et l'eau qui est au-dessous de ce piston communique avec l'atmosphère, par les tuyaux Q, S : ce qui fait que le piston N descend, en entraînant avec lui les deux pistons H, K. Le robinet O est muni, à l'une de ses extrémités, d'une manivelle T, dont le bouton s'engage dans l'œil allongé qui termine une bielle U, articulée à un prolongement de la tige du piston A. Tant que le bouton de la manivelle T se trouve entre les extrémités de cet œil, le piston A se meut, sans que le robinet O prenne le moindre mouvement ; la bielle U n'agit sur la manivelle T que lorsque le piston A est près d'atteindre l'une ou l'autre des extrémités de sa course. Il est aisé de comprendre, d'après cela, que la machine se suffit à elle-même, et qu'elle doit marcher ainsi indéfiniment, sans qu'on ait besoin de s'en occuper, tant qu'il arrivera par le tuyau E de l'eau capable de vaincre par sa pression les résistances appliquées au piston A.

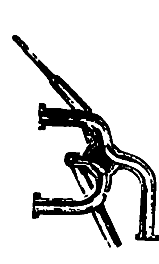


Fig. 461.

La machine à colonne d'eau à double effet peut être employée à faire mouvoir toute espèce de mécanisme. Il suffit pour cela de faire en sorte que le mouvement de va-et-vient du piston A détermine le mouvement de rotation d'un arbre, ainsi que nous l'expliquerons plus tard en traitant des machines à vapeur (§§ 424 et 435). Dans ce cas, l'appareil régulateur peut être modifié : on peut adapter à l'arbre que la machine fait tourner un *excentrique* destiné à donner directement aux deux pistons H, K, le mouvement de va-et-vient que ces pistons doivent prendre pour faire

agir l'eau motrice tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Nous verrons, à l'occasion des machines à vapeur (§ 424), en quoi consiste cet excentrique dont nous nous contentons ici d'indiquer l'application à la machine à colonne d'eau.

§ 390. **Bélier hydraulique.** — Nous avons dit (§ 373) que l'eau d'une chute agissait quelquefois d'elle-même, sans intermédiaire, pour produire du travail utile : nous allons en voir un exemple remarquable dans le *bélier hydraulique*. Cette machine ingénieuse, inventée par Montgolfier en 1796, a pour objet de profiter de la force d'une chute d'eau, pour élever une portion de l'eau fournie par la chute à un niveau supérieur à celui du bief d'amont.

Imaginons que l'eau de la chute dont on dispose ne puisse s'écouler que par un tuyau d'une certaine longueur, qui débouche au bas de la hauteur de chute. Lorsque ce tuyau sera ouvert à son extrémité inférieure, l'eau s'écoulera en prenant une vitesse qui dépendra à la fois de la hauteur de chute et des frottements occasionnés par son mouvement dans le tuyau. L'écoulement étant établi, si l'on vient tout à coup à fermer l'orifice de sortie du tuyau, toute l'eau contenue à son intérieur sera obligée de s'arrêter brusquement; mais cela ne se fera pas sans que cette masse d'eau exerce une pression énorme sur les parois qui la renferment. Concevons maintenant qu'un tuyau d'ascension s'embranche sur le tuyau d'écoulement dont nous venons de parler, et que l'extrémité inférieure de ce tuyau d'ascension soit fermée par une soupape s'ouvrant de bas en haut. Au moment où la colonne d'eau en mouvement sera brusquement arrêtée, elle ouvrira la soupape et s'élancera dans le tuyau d'ascension, où elle montera jusqu'à une certaine hauteur. Si l'on recommence à produire le mouvement de l'eau dans le tuyau d'écoulement, et à l'arrêter tout à coup en fermant l'orifice, le liquide ouvrira de nouveau la soupape du tuyau d'ascension, pour passer en partie dans ce tuyau, où le niveau s'élèvera en conséquence. En répétant successivement la même opération, on pourra déterminer ainsi l'élévation de l'eau dans le tuyau d'ascension, à une hauteur beaucoup plus grande que la hauteur de chute ; et, si ce tuyau aboutit à un réservoir supérieur, on pourra emplir le réservoir, en opérant comme nous venons de le dire, pendant un temps suffisamment long. Tel est le principe du bélier hydraulique. Voyons maintenant quelle est la disposition que lui a donnée Montgolfier, et d'après laquelle il fonctionne seul, sans qu'on ait besoin de s'en occuper.

La figure 462 *est une coupe* d'un bélier hydraulique qui existe

au château de la Celle-Saint-Cloud, près Paris, et qui a été établi par Montgolfier lui-même, pour l'élévation de l'eau nécessaire aux besoins du château. L'eau d'une pièce d'eau, située à un niveau supérieur, et alimentée par des sources, est amenée par le tuyau A. Ce tuyau présente une ouverture tournée vers le haut, par laquelle l'eau s'écoule. Une soupape B est suspendue par sa



Fig. 402. (*Échelle de 12 centimètres pour mètre.*)

tige à une sorte d'étrier qui surmonte cette ouverture, et se trouve ainsi sur le chemin du liquide, qui passe tout autour d'elle pour sortir. A partir du moment où l'écoulement commence, la vitesse de l'eau va en augmentant ; il en résulte que la soupape B éprouve de bas en haut, de la part du liquide, une pression de plus en plus grande ; bientôt cette pression suffit pour la soulever, et elle vient s'appliquer contre les bords de l'orifice, qu'elle ferme complétement. Alors toute la masse d'eau contenue dans le tuyau A, se trouvant animée d'une vitesse un peu grande, et ne pouvant plus sortir par cet orifice, exerce une pression considérable sur toutes les parties des parois qui la contiennent ; cette pression ouvre les soupapes E, E ; une certaine quantité d'eau,

traversant ces soupapes, se rend ainsi dans un réservoir qui les enveloppe, et d'où elle passe dans un tuyau d'ascension G. Au bout d'un temps très-court, toute la vitesse de l'eau contenue dans le tuyau A est anéantie; les soupapes E, E, se ferment ; la soupape B, qui n'éprouve plus une aussi grande pression sur sa face inférieure, retombe dans sa position primitive, et le jeu de la machine recommence comme précédemment. L'eau qui sort du tuyau A, pendant tout le temps que la soupape B est ouverte, tombe sur le sol environnant et s'écoule au dehors par le tuyau D.

Le tuyau A se relève à son extrémité de gauche, pour aboutir à une capacité C au bas de laquelle sont les soupapesE, E. Cette capacité contient de l'air à sa partie supérieure. La pression de cet air joue un grand rôle dans la marche de la machine. Lorsque l'écoulement de l'eau est brusquement arrêté par la fermeture de la soupape B, si le liquide ne se trouvait en contact qu'avec des parois solides, il se produirait un choc assez violent; et c'est en vertu de ce choc que les soupapes E, E, s'ouvriraient pour livrer passage à une certaine quantité d'eau. L'air contenu en C fait disparaître ce choc presque complétement, ce qui empêche l'appareil de se détériorer aussi promptement, et donne lieu en même temps à la production d'une plus grande quantité de travail utile. Au moment où l'eau ne peut plus s'écouler au dehors, elle comprime l'air, et perd ainsi peu à peu sa vitesse ; en même temps la pression exercée par l'eau de tous côtés va en augmentant. Lorsque la vitesse de l'eau est complétement anéantie, l'air réagit pour reprendre son volume primitif; il repousse l'eau, qui rétrograde dans le tuyau A, et la pression diminue. Pendant ce temps les soupapes E, E, restent ouvertes, tant que la pression qu'elles éprouvent de dedans en dehors surpasse celle qui est constamment exercée sur leurs faces extérieures, et elles livrent ainsi passage à une portion du liquide. Le mouvement rétrograde que prend l'eau dans le tuyau A, et qui est produit par la réaction de l'air contenu en C, ne cesse pas au moment où la pression s'est réduite à celle qui est due à la hauteur de la chute; l'eau continue à se mouvoir, en vertu de sa vitesse acquise; la pression continue donc aussi à décroître, et devient même inférieure à la pression atmosphérique. Cette espèce d'aspiration intérieure fait tomber la soupape B, et l'eau recommence à sortir comme précédemment par l'ouverture qui la surmonte.

Le réservoir F, qui enveloppe les soupapes E, E, et duquel part le tuyau d'ascension G, contient également de l'air à sa partie supérieure. *Cette seconde* masse d'air a pour objet d'entretenir un

mouvement continu dans le tuyau d'ascension, et agit exactement de la même manière que celle dont nous avons parlé précédemment, à l'occasion de la pompe à incendie (§ 356). Au moment où les soupapes E, E, s'ouvrent, l'eau pénètre dans le réservoir, en comprimant l'air qui y est contenu, et n'est pas obligée de s'élancer immédiatement dans le tuyau d'ascension, comme cela arriverait sans cette disposition. Il est clair que la pression nécessaire pour ouvrir les soupapes E, E, serait beaucoup plus grande, dans le cas où toute la colonne d'eau contenue dans le tuyau G devrait passer brusquement de l'état de repos à l'état de mouvement, au moment de leur ouverture; et qu'en conséquence ces soupapes resteraient ouvertes moins longtemps à chaque coup du bélier. La suppression de l'air contenu en F entraînerait donc une diminution considérable dans le volume de l'eau élevée.

L'eau dissout toujours une certaine quantité de l'air avec lequel elle est en contact. C'est cet air dissous dans l'eau qui s'en dégage lorsqu'on la chauffe dans un vase ouvert, et qui s'attache aux parois du vase sous forme de petites bulles. La quantité d'air que l'eau absorbe ainsi est d'ailleurs d'autant plus grande qu'il est soumis à une plus forte pression. Il résulte de là que l'air contenu dans le réservoir F doit se dissoudre peu à peu dans l'eau qui y arrive constamment, et cela en raison de la pression qu'il éprouve, d'après la hauteur à laquelle l'eau est élevée dans le tuyau G. Cette masse d'air doit donc diminuer progressivement, et même disparaître complétement, si l'on n'emploie pas un moyen particulier pour la renouveler. C'est pour cela qu'on a pratiqué une ouverture horizontale H, au-dessous d'une des deux soupapes E. Cette ouverture est fermée par une soupape qui s'ouvre de dehors en dedans. Au moment où, par le mouvement rétrograde de l'eau dans le tuyau A, il se produit une sorte d'aspiration à l'intérieur de ce tuyau, une petite quantité d'air atmosphérique entre par le conduit H, en ouvrant la soupape qui le fermait, et vient se mêler à l'air déjà contenu en C. L'arrivée de cette petite quantité d'air, à chaque coup de bélier, fait qu'une portion correspondante de l'air du réservoir C traverse les soupapes E, lorsqu'elles sont ouvertes, et monte dans la partie supérieure du réservoir F, pour y remplacer celui que l'eau emmène constamment à l'état de dissolution.

Lorsque le bélier hydraulique est bien établi, il peut utiliser jusqu'aux 0,60 du travail moteur dépensé.

MACHINES QUI SERVENT A FAIRE MOUVOIR LES GAZ.

§ 391. On a besoin, dans un assez grand nombre de circonstances, d'employer des machines pour faire mouvoir des gaz. Tantôt il s'agit de retirer d'une capacité fermée une portion plus ou moins grande du gaz qu'elle contient; tantôt, au contraire, il s'agit d'accumuler une grande quantité de gaz dans une pareille capacité; tantôt on a besoin de lancer de l'air en lui donnant une grande vitesse, soit pour alimenter la combustion dans un fourneau, soit pour entraîner des matières réduites à l'état de poussières; tantôt on veut produire l'aérage d'une mine, en faisant circuler l'air dans ses galeries. Nous allons faire connaître la disposition des diverses machines qui sont employées pour atteindre ces divers buts.

Quel que soit l'objet que la machine doive remplir, on doit toujours faire en sorte que le gaz qu'elle met en mouvement n'ait à son intérieur qu'une faible vitesse, pour éviter les frottements considérables qui en résulteraient. Il faut aussi avoir soin de ne pas faire mouvoir le gaz le long de surfaces anguleuses, et autant que possible, de ne pas lui faire traverser des ouvertures trop étroites. Si la machine est destinée seulement à déplacer une certaine masse de gaz, on doit la disposer de manière que le gaz, en la quittant, ait une vitesse aussi petite que possible; car la vitesse qu'il possède après sa sortie de la machine ne peut lui avoir été communiquée qu'aux dépens du travail moteur dépensé. Si la machine doit lancer le gaz avec une vitesse un peu grande, il faut tâcher que cette vitesse ne lui soit donnée qu'au point où le jet gazeux doit produire son effet, afin qu'il n'ait pas à se mouvoir rapidement dans des tuyaux plus ou moins longs.

§ 392. **Machine pneumatique.** — La *machine pneumatique*, dont nous nous sommes déjà servis pour diverses expériences, a pour objet de faire le vide dans un espace fermé, c'est-à-dire d'en retirer l'air qui y est contenu. Cette machine (fig. 463), se compose, à proprement parler, de deux pompes aspirantes (§ 351) accolées l'une à l'autre. Les tiges des deux pistons sont dentées en forme de crémaillères; elles engrènent avec une roue dentée, qui est installée au milieu d'elles, et dont l'axe est muni d'un levier à poignées, formant comme une double manivelle. En saisissant les deux poignées, et en donnant au levier un mouvement de rotation alternatif autour de son axe, on fait monter ou descendre successivement chacun des deux pistons. Mais, pour nous rendre compte de la manière dont la machine fonctionne

pour faire le vide, nous admettrons d'abord qu'il n'y a qu'un seul piston, et par suite un seul corps de pompe.

Lorsque le piston B (fig. 464), monte dans le corps de pompe A, la soupape *a* est ouverte, et la soupape *d*, adaptée à une ouverture qui traverse le piston, est au contraire fermée. Le bas du corps de pompe communique alors librement, par le tuyau CC, avec l'inté-



Fig. 463.

rieur d'une cloche ou *récipient* D, dont les bords s'appliquent exactement sur la platine EE, en supposant toutefois que le robinet F soit convenablement tourné ; tandis que toute communication de cette capacité au dehors est interceptée. L'air contenu dans le récipient D, dans le conduit CC, et au bas du corps de pompe A, se dilate à mesure que le piston s'élève, pour occuper la totalité de l'espace qui lui est offert ; une portion de l'air du récipient et du conduit CC passe donc dans le corps de pompe. Lorsque le piston vient ensuite à s'abaisser, la soupape *a* se ferme, et l'air qui se trouve dans le corps de pompe, au-dessous du piston, est comprimé de plus en plus ; sa force élastique augmentant, il arrive un moment où elle est un peu supérieure à celle de l'air atmosphéri-

que : alors la soupape *d* s'ouvre, sous la pression de l'air qui tend à sortir, et cet air traverse le piston, pour se rendre dans la partie supérieure du corps de pompe, qui communique toujours librement avec l'atmosphère par quelques ouvertures pratiquées à cet effet. Le piston, étant arrivé au bas de sa course, reprend un mouvement ascendant : la soupape *d* se ferme, la soupape *a* s'ouvre, et les choses recommencent comme précédemment.

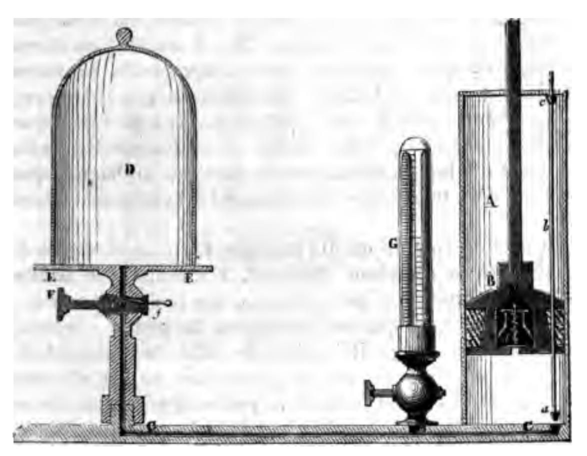


Fig. 464.

La soupape *a* est fixée à une tige *b*, qui traverse le piston B à frottement dur. En raison de cette disposition, le piston tend constamment à élever la soupape *a*, tant qu'il monte, et à l'abaisser, tant qu'il descend ; mais un talon *c*, fixé à la tige *b*, vers sa partie supérieure, empêche la soupape de s'élever d'une trop grande quantité, et il en résulte que la soupape ne peut se mouvoir que très-peu, soit de bas en haut, soit de haut en bas. Aussitôt que le piston commence sa course ascendante ou descendante, il ouvre ou ferme la soupape *a*, puis elle reste immobile, et le piston continuant à se mouvoir, la tige *b* glisse à son intérieur. Il était important d'adopter cette disposition pour la soupape *a*, car la différence des forces élastiques du gaz situé sous le piston et dans le récipient est habituellement très-faible vers la fin de l'opération, et l'on n'aurait pas pu compter sur elle pour ouvrir ou fermer la soupape au moment convenable.

Le robinet F est percé d'une ouverture *e*, qui, pendant l'opéra-

tion, doit être tournée de manière à se raccorder avec le conduit vertical qui aboutit au centre de la platine EE. Lorsqu'on a fait le vide suffisamment, sous le récipient D, on ferme le robinet, afin d'intercepter toute communication du récipient avec le conduit CC et le corps de pompe. Une clavette *f*, que l'on enlève à volonté, permet de faire rentrer l'air extérieur dans le récipient, par un petit conduit qui aboutit à l'extrémité du robinet F, et qui est habituellement fermé par cette clavette.

Un large tube de verre G, fermé par le haut, est ordinairement en communication avec le conduit CC; il contient un baromètre de petite dimension, que l'on nomme *éprouvette*. Ce baromètre est destiné à mesurer la force élastique du gaz intérieur, pour faire juger de la marche de l'opération. On a pu lui donner des dimensions beaucoup plus petites qu'au baromètre ordinaire, parce qu'il n'a besoin d'indiquer la pression intérieure que lorsqu'elle est déjà très-faible relativement à la pression atmosphérique.

Il est aisé de voir de quelle manière la force élastique de l'air contenu dans le récipient diminue, à mesure que la machine fonctionne. Admettons, par exemple, que la capacité de la partie du corps de pompe qui est au-dessous du piston, lorsqu'il est au haut de sa course, soit le tiers de celle du récipient D et du conduit CC réunis; lorsque le piston est au bas du corps de pompe, et qu'il s'élève jusqu'à sa partie supérieure, le volume de l'air contenu dans le récipient D et le conduit CC s'accroît dans le rapport de 3 à 4; la force élastique de cet air se réduit donc aux trois quarts de ce qu'elle était. Le piston s'abaissant ensuite, la force élastique de l'air du récipient ne varie pas. Ainsi chaque coup de piston a pour effet de réduire la force élastique du gaz contenu dans le récipient aux trois quarts de ce qu'elle était. Après le premier coup de piston, cette force élastique sera les $\frac{3}{4}$ de celle de l'air atmosphérique; après le second, elle en sera les $\frac{9}{16}$; après le troisième, elle en sera les $\frac{27}{64}$; et ainsi de suite. On voit donc que, quelque grand que soit le nombre des coups de piston que l'on donne, il restera toujours de l'air dans le récipient; mais la force élastique de cet air pourra être rendue aussi petite qu'on voudra.

Ce que nous venons de dire suppose que, chaque fois que le piston s'abaisse jusqu'au bas du corps de pompe, il oblige la totalité de l'air situé au-dessous de lui à le traverser, en soulevant la soupape *d*, pour se répandre dans l'atmosphère. Mais il est impossible de satisfaire complétement à cette condition : lorsque le piston est au bas de sa course, il reste toujours un peu d'air au-

lessous de lui. Il en résulte que le mouvement ascendant du pison ne fait pas sortir autant d'air du récipient qu'il le ferait sans cela, puisque cet air qui est resté sous le piston, en se dilatant pour se mettre en équilibre de pression avec l'air du récipient, occupe une portion notable du corps de pompe. L'influence nuisible de la circonstance dont nous parlons se fait sentir de plus en plus, à mesure que la pression diminue dans le récipient; et il arrive même un moment où elle empêche que cette pression ne diminue davantage : elle fait que la force élastique du gaz qui reste dans le récipient ne peut pas décroître au delà d'une certaine limite. On doit donc, dans la construction d'une machine pneumatique, se préoccuper surtout de faire en sorte que la face inférieure du piston s'applique le mieux possible sur le fond du corps de pompe.

La machine pneumatique, dont l'invention est due à Otto de Guericke, se composait d'abord d'une seule pompe aspirante, comme celle que nous venons de décrire. Mais la manœuvre en était très-pénible, surtout lorsqu'on avait déjà beaucoup diminué la force élastique du gaz intérieur, en raison de ce qu'on avait à vaincre la pression atmosphérique, qui s'exerce toujours sur la face supérieure du piston, et qui n'était pas contre-balancée par la pression beaucoup plus faible agissant sur la face inférieure. C'est pour faciliter l'opération, que l'on a imaginé d'employer deux pompes aspirantes dont les pistons sont mis en mouvement en même temps et en sens contraire, à l'aide d'une roue dentée qui engrène avec leurs tiges également dentées (fig. 463). Ces deux pistons, éprouvant l'un et l'autre la pression atmosphérique sur leurs faces supérieures, exercent chacun une force de traction de haut en bas sur la roue dentée; mais ces deux forces se font équilibre, et la manœuvre simultanée des deux pistons n'est pas plus difficile que si la pression atmosphérique n'agissait pas du tout sur eux. Il n'y a de résistance à vaincre que celle qui provient de la différence de pression supportée de bas en haut par les faces inférieures des deux pistons. Les deux corps de pompe communiquent avec un conduit unique, qui est d'abord horizontal, puis se relève verticalement pour aboutir au centre de la platine, comme dans la machine à un seul corps de pompe.

La machine pneumatique est généralement employée pour faire des expériences de diverses natures, dans lesquelles on a besoin de faire le vide, ou au moins de diminuer la pression dans des capacités de petites dimensions. Nous allons voir cependant un exemple de l'emploi de cette machine pour faire le vide dans un espace considérable.

§ 393. **Chemin de fer atmosphérique.** — On a eu l'idée de se servir de la pression atmosphérique pour faire mouvoir les convois de wagons sur les chemins de fer. Si l'on imagine qu'un long tuyau soit établi sur le sol, entre les deux rails d'une voie de fer, et qu'un piston lié au premier wagon d'un convoi soit engagé dans ce tuyau, il suffira de faire le vide dans la partie du tuyau vers laquelle on veut produire le mouvement, pour que le piston soit poussé par la pression atmosphérique, agissant sur sa face postérieure, et entraîne avec lui tout le convoi. On voit que la force qui se développe ainsi dépend de la grandeur de la surface du piston, et du degré de vide que l'on opère dans la partie antérieure du tuyau; mais qu'elle ne dépend nullement de la pente du chemin. Ce moyen de traction pour les convois, qui peut être substitué à l'emploi des locomotives sur les chemins horizontaux ou peu inclinés, tels qu'on les construit ordinairement, peut donc en outre permettre de gravir de fortes pentes, pour lesquelles l'action des locomotives serait très-faible, si elle n'était pas complétement annulée (§ 192).

Le système de chemin de fer dont nous parlons a été imaginé par M. Clegg, et est connu sous le nom de *chemin de fer atmosphérique*. Plusieurs essais en ont été faits. Nous citerons comme exemple celui qui a été établi à l'extrémité du chemin de fer de Paris à Saint-Germain, et qui a servi pendant quelques années à gravir la rampe qui aboutit à cette dernière ville. D'immenses machines pneumatiques, établies vers le haut de la rampe, étaient mises en mouvement par des machines à vapeur. La figure 465 représente la coupe d'un des quatre corps de pompe de ces machines. On voit que chacune de ces quatre pompes aspirantes est à double effet. La figure est faite en supposant que le piston monte; il aspire l'air par la soupape qui est ouverte au bas et à droite; et en même temps il rejette au dehors l'air qui se trouve au-dessus de lui, en le faisant passer par l'ouverture de la soupape de gauche, adaptée au fond supérieur du corps de pompe. Lorsque le piston redescend, les deux soupapes qui sont ouvertes se ferment; les deux autres, qui occupent les autres angles de la figure, s'ouvrent; et le piston aspire l'air dans la partie supérieure du corps de pompe, tandis qu'il rejette dans l'atmosphère celui qui s'est rendu précédemment dans la partie inférieure. Les deux tuyaux, dont on ne voit que le commencement sur la figure, et qui correspondent aux deux soupapes de droite, communiquent avec le long tube placé au milieu de la voie de fer sur laquelle les convois doivent se mouvoir.

Pour que le premier wagon d'un convoi puisse être relié

d'une manière permanente avec le piston sur lequel doit agir la pression atmosphérique, il est nécessaire que le tube dans lequel ce piston se meut présente une ouverture longitudinale, une sorte de fente, à travers laquelle puissent passer les pièces de jonction du wagon au piston. Mais il faut que cette ouverture soit hermé-

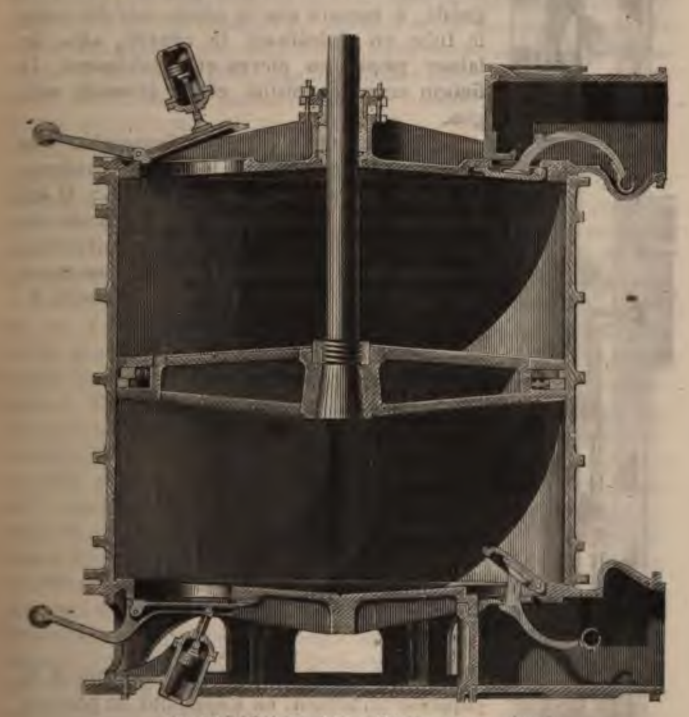


Fig 165. (*Echelle de 22 millimètres pour mètre.*)

tiquement fermée, dans la partie du tube où l'on fait le vide, afin que l'air extérieur ne puisse pas la traverser, pour venir remplacer à chaque instant l'air qui est enlevé par les machines pneumatiques. Pour atteindre ce but, on a disposé, dans toute la longueur du tube, une soupape formée d'une bande de cuir, longue et étroite, dont un des bords est fixé au tube, d'un côté de l'ouverture longitudinale. Cette soupape est renforcée par des plaques de *tôle fixées sur* sa face supérieure, et n'en conserve pas



Fig. 466.

moins une certaine flexibilité, en raison de ce que ces plaques sont petites et nombreuses. Elle s'applique habituellement sur les deux bords de l'ouverture, qu'elle ferme ainsi complétement; mais elle est soulevée successivement dans les diverses parties de sa longueur, à mesure que le piston marche dans le tube en entraînant le convoi, afin de laisser passer les pièces qui établissent la liaison entre ce piston et le premier wagon.

La figure 466 représente l'ensemble des appareils qui constituent le piston moteur. Le piston proprement dit est en A; il est muni sur tout son contour d'une bande de cuir qui s'applique sur les parois intérieures du tube, afin d'empêcher l'air de passer entre ces parois et le piston. Un second piston B,



Fig. 467.

placé en avant du premier, est destiné à le suppléer au besoin, en s'opposant au passage de l'air qui n'aurait pas été arrêté par le premier piston. La tige commune à ces deux pistons est fixée à l'extrémité d'une sorte de châssis long et étroit CC. Une plaque de tôle D, attachée à ce châssis, sert à relier le piston au wagon qui est situé au-dessus; cette plaque sort du tube en se recourbant, pour passer autour du bord de la soupape, sans que celle-ci ait besoin d'être trop ouverte (fig. 467).

À l'extrémité postérieure du châssis CC est adaptée une pièce de fonte E, destinée à faire contre-poids aux pistons A, B, afin que le centre de gravité de tout l'appareil soit sensiblement placé au milieu de la plaque de tôle D qui le supporte. Le châssis CC porte deux pièces F, F, qui ont pour objet de soulever la soupape longitudinale du tube; cinq galets G, G, dont les axes sont également supportés par le châssis CC, roulent sur la face inférieure de cette soupape H (fig. 467), en la maintenant suffisamment ouverte, pour que la pièce D puisse passer librement, et aussi pour que l'air extérieur puisse rentrer, à mesure que le piston s'avance dans le tube.

On n'employait la pression atmosphérique, pour faire mouvoir les convois, que lorsqu'ils montaient la rampe qui conduit à Saint-Germain. La seule action de la pesanteur suffisait pour les faire descendre le long de cette rampe, jusqu'au point où finissait le tube atmosphérique, et où des locomotives venaient les remorquer. Si l'on voulait se servir de la même voie pour la descente que pour la montée, tout l'appareil des pistons A, B, et du châssis CC, avec ce qu'il porte, devait parcourir le tube atmosphérique en sens contraire. Pour qu'il n'en résultât pas de trop grands frottements, on faisait basculer les pistons A, B, de manière à leur donner la position oblique qui est ponctuée sur la figure 466. A cet effet, une tringle *ab* est articulée d'une part au piston A, et d'une autre part au levier *bcd*, mobile autour du point *c*; une seconde tringle *de* relie le levier *bcd* à un levier *ef*, qui traverse l'ouverture de la soupape, en passant le long de la plaque D, et peut être manœuvré de l'intérieur du wagon. En agissant sur ce levier *ef*, de manière que son extrémité inférieure *e* se reporte vers la droite de la figure, on pousse la partie inférieure du piston A vers la gauche, et on l'amène ainsi à prendre la position oblique dont nous venons de parler. Une tringle, articulée d'une part au piston A, d'une autre part au piston B, fait que ce second piston se place de la même manière que le premier.

Le système de chemin de fer que nous venons de décrire a fonctionné pendant plusieurs années à Saint-Germain et a très-bien réussi; mais il est extrêmement coûteux, et ce n'est que dans des circonstances exceptionnelles qu'on pourrait l'employer avec avantage.

§ 394. Machines aspirantes. — Nous avons indiqué (§ 262) un moyen qui est très-employé pour produire artificiellement l'aérage d'une mine, et qui consiste à établir un foyer vers le bas d'un puits, pour déterminer un courant d'air par les différences

de température. Mais on se sert aussi, pour atteindre le même but, de machines destinées à mettre en mouvement la masse d'air contenue à l'intérieur de la mine.

Pour qu'il y ait renouvellement de l'air intérieur, il faut toujours que la cavité souterraine communique par deux voies différentes avec l'air extérieur, soit par deux puits distincts, soit par deux portions d'un même puits, que l'on a isolées l'une de l'autre au moyen d'une cloison qui s'étend dans toute sa profondeur. Le mouvement qu'il s'agit de produire a pour effet de faire descendre l'air atmosphérique par un des deux puits, s'il y en a deux, de le faire circuler dans les différentes parties de la mine qui doivent être aérées, et ensuite de le faire remonter par l'autre puits. Pour y arriver, on emploie souvent des machines aspirantes, que l'on installe à l'orifice du puits par lequel on veut faire sortir l'air intérieur ; ce sont de véritables machines pneumatiques, avec cette différence qu'elles doivent extraire du puits une grande quantité d'air, en n'y déterminant qu'une très-faible diminution de pression. A mesure que la machine fonctionne, l'air de la mine se met en marche, pour combler le vide qu'elle tend à opérer; et il en résulte une circulation continuelle de cet air.

Ces machines aspirantes présentent habituellement la même disposition que la machine pneumatique. Ce sont de vastes cylindres ouverts par le haut, dont le fond est percé de larges ouvertures munies de soupapes, et dans lesquels se meuvent des pistons percés également d'ouvertures à soupapes. Nous indiquerons cependant une disposition particulière, qui est très-employée dans les mines du Hartz, et qui a pour objet de faire disparaître presque complétement les frottements des pistons contre les parois des cylindres. Deux cloches cylindriques A, A' (fig. 468), sont suspendues aux deux extrémités d'un balancier B, au moyen de chaînes C, C'. Le mouvement oscillatoire que l'on donne au balancièr autour de son milieu fait élever et abaisser successivement chacune de ces cloches, qui plongent dans des cuves remplies d'eau. Des tuyaux D, D', s'élèvent au milieu de ces cuves, jusqu'au-dessus de la surface de l'eau, et communiquent par leur partie inférieure avec un conduit E, par lequel l'air de la mine doit être aspiré ; l'orifice supérieur de chacun de ces tuyaux est fermé par une soupape s'ouvrant de bas en haut. Les cloches A, A', sont d'ailleurs percées, dans le haut, d'ouvertures garnies de soupapes qui s'ouvrent dans le même sens. Lorsqu'une cloche A s'élève, sa soupape se ferme, et l'air de la mine se rend à son intérieur, en passant par le tuyau D, dont la soupape s'ouvre. Lorsque ensuite cette cloche s'abaisse.

la soupape du tuyau D se ferme, celle de la cloche s'ouvre, et l'air contenu à son intérieur est expulsé au dehors. Le niveau de l'eau de chaque cuve n'est pas le même à l'intérieur de la cloche et à l'extérieur, en raison de ce que la force élastique de l'air contenu dans la cloche est tantôt plus grande, tantôt plus petite que celle de l'air atmosphérique; mais ces variations de force

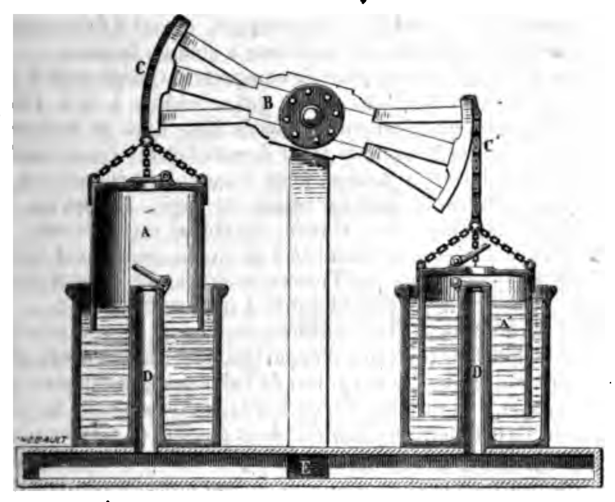


Fig. 468.

élastique sont assez faibles pour qu'il n'en résulte pas de différences de niveau considérables pour le liquide. On voit que ce moyen d'éviter les frottements d'un piston contre les parois du cylindre dans lequel il se mouvrait, n'est applicable qu'autant que l'on n'a pas à produire de grands changements dans la force élastique du gaz sur lequel la machine doit opérer.

§ 395. **Machine de compression.** — Quand on veut accumuler une grande quantité d'air dans un espace fermé, on se sert d'une machine de compression, qui est exactement pareille à la machine pneumatique représentée par la figure 463 (page 586), si ce n'est que toutes les soupapes sont disposées en sens inverse, c'est-à-dire qu'elles s'ouvrent de haut en bas. Lorsqu'un des pistons s'élève, sa soupape s'ouvre, et celle qui est au bas du corps de pompe se ferme; l'air l'extérieur, en traversant le piston, vient remplir la portion du corps de pompe qui est au-dessous de lui. Lorsque ensuite le piston s'abaisse, sa soupape se ferme; il com-

prime l'air qui vient de le traverser, et le fait ainsi passer dans le récipient, en ouvrant la soupape qui se trouve au bas du corps de pompe. Il suffit donc de donner un mouvement de va-et-vient à chacun des deux pistons, pour introduire constamment de nouvelles quantités d'air dans le récipient, qui a besoin en conséquence d'être fortement maintenu, pour résister à la pression de l'air intérieur. Un manomètre à air comprimé (§ 258) remplace l'éprouvette de la machine pneumatique, et sert à faire connaître la force élastique du gaz intérieur à chaque instant.

C'est à l'aide d'une machine de compression, analogue à celle dont nous venons de parler, mais qui se réduit à une simple pompe foulante, que l'on comprime de l'air dans la crosse des fusils connus sous le nom de *fusils à vent*. Cet air comprimé est destiné à remplacer la poudre, pour donner une impulsion aux projectiles introduits dans le canon du fusil. Lorsqu'on veut faire partir ces projectiles, il suffit de lâcher une détente, qui laisse sortir une certaine quantité d'air de la crosse ; cet air, ne pouvant s'échapper que par l'intérieur du canon, chasse devant lui les corps qu'on y a précédemment introduits.

§ 396. **Soufflets.** — Les soufflets, dont on se sert pour activer la combustion dans les foyers d'appartements, ne sont autre chose que des machines destinées à puiser de l'air dans l'atmosphère, pour le lancer avec une certaine vitesse sur le combustible en ignition.

Le soufflet ordinaire est formé de deux plaques de bois terminées chacune par un manche A, B (fig. 469), et réunies l'une à l'autre par une pièce de cuir flexible, qui laisse entre elles un espace C fermé de toutes parts. Une ouverture D, percée dans la plaque inférieure, est recouverte en dedans d'un morceau de cuir flexible, qui n'est attaché qu'en quelques points de son contour, et fait fonction de soupape. Ce morceau de cuir s'applique sur l'ouverture D, et la ferme complétement, lorsque l'air intérieur tend à sortir ; tandis que, si l'air extérieur tend à pénétrer dans le soufflet par l'ouverture D, il soulève facilement le cuir, et peut ainsi entrer librement. Un tuyau allongé et conique E termine le soufflet ; c'est par ce tuyau que l'air doit être lancé de l'intérieur à l'extérieur. Pour manœuvrer le soufflet, on saisit un des manches A, B, dans chaque main, et l'on fait mouvoir le manche B de manière à l'éloigner et à le rapprocher alternativement de l'autre. En vertu de ce mouvement, la capacité

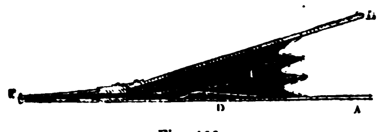


Fig. 469.

intérieure C augmente et diminue alternativement. Lorsque cette capacité augmente, il se forme un vide à l'intérieur, et l'air atmosphérique s'y introduit à la fois par les ouvertures D, E, mais surtout par la première D, qui est plus large. Lorsque, au contraire, les deux manches A, B, se rapprochent l'un de l'autre, l'air intérieur est comprimé, et ne pouvant sortir par l'ouverture D, qui est alors fermée, il est obligé de s'échapper en totalité par le tuyau E.

Le jet gazeux ne sort que par intermittence du soufflet dont nous venons de parler, et de plus, au moment où se fait l'aspiration, l'air extérieur tendant à entrer aussi bien par le tuyau E que par l'ouverture D, il peut arriver que de la flamme entre par ce tuyau, et vienne brûler l'intérieur du soufflet. Pour obvier à ces deux inconvénients, on a imaginé les soufflets dits *à double vent*. Un soufflet de ce genre est formé de trois plaques de bois, dont deux seulement se terminent par des manches A, B (fig. 470). Entre ces plaques sont disposées, comme précédemment, deux pièces de cuir qui forment deux compartiments C, F. Le premier de ces compartiments C, communique avec l'extérieur par une ouverture D, garnie d'une soupape de cuir pareille à celle dont nous avons déjà parlé ; il communique en outre avec le second compartiment F, par une ouverture E garnie d'une soupape du même genre. A l'extrémité de ce second compartiment F existe un conduit aboutissant au tuyau conique G, par lequel l'air doit être lancé. Lorsqu'on écarte les deux manches A, B, la soupape E se ferme, la soupape D s'ouvre, et l'air extérieur pénètre dans le compartiment C. Lorsque ensuite on rapproche les deux manches A, B, la soupape D se ferme, la soupape E s'ouvre, et l'air passe de C en F. Un petit ressort intérieur tend constamment à rapprocher l'une de l'autre les deux plaques de bois qui comprennent entre elles le compartiment F. Au moment où l'air passe de C en F, ce petit ressort cède, et permet à l'espace F de s'agrandir pour le contenir; mais il réagit bientôt, et en comprimant cet air, il l'oblige à sortir par le tuyau G. Si l'on continue à faire mouvoir les manches A et B, en les éloignant et en les rapprochant successivement l'un de l'autre, de nouvelles quantités d'air viendront à chaque instant de C en F, avant que la réaction du ressort ait eu le temps d'expulser *la totalité de* l'air qui s'était précédemment introduit *dans le second* compartiment F. La sortie de l'air par le

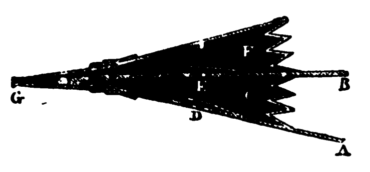


Fig. 470.

tuyau G n'éprouve donc pas d'interruption, et le jet gazeux présente une régularité d'autant plus grande que le mouvement des manches A et B est plus rapide, ce qui ne permet pas à la tension du ressort contenu en F de varier dans des limites trop étendues.

§ 397. **Machines soufflantes.** — Pour lancer de l'air à l'intérieur des fourneaux, dans les usines, on emploie des machines soufflantes de diverses formes, mises en mouvement, soit par des roues hydrauliques, soit par des machines à vapeur. Quelquefois ce sont d'immenses soufflets analogues aux soufflets que nous venons de décrire, d'autres fois ce sont des machines à piston, en tout pareilles à la machine pneumatique représentée par la figure 465 (page 591), si ce n'est que les soupapes s'ouvrent en sens contraires. Lorsqu'on emploie ces dernières machines, l'air qu'elles puisent dans l'atmosphère est refoulé par elles dans des tuyaux qui le conduisent aux différents orifices par lesquels il doit s'échapper. La régularité de la vitesse avec laquelle l'air est lancé étant d'une grande importance pour la marche des fourneaux, on emploie souvent pour l'obtenir un moyen analogue à celui que nous avons trouvé dans le soufflet à double vent. Ce moyen consiste à placer sur le chemin que doit parcourir l'air, à sa sortie de la machine, un réservoir cylindrique (fig. 471), dans lequel se trouve un piston chargé de poids et libre de monter ou de descendre en glissant sur les parois du réservoir. L'air fourni par la machine arrive dans ce réservoir d'un côté, et en sort de l'autre. Au moment où une grande quantité d'air vient se rendre dans cette capacité intermédiaire, le piston s'élève ; il s'abaisse, au contraire, lorsque l'air arrive en moins grande abondance : en sorte que la force élastique de l'air contenu au-dessous du piston régulateur reste à très-peu près la même, et la vitesse avec laquelle il sort du réservoir ne varie pas sensiblement.

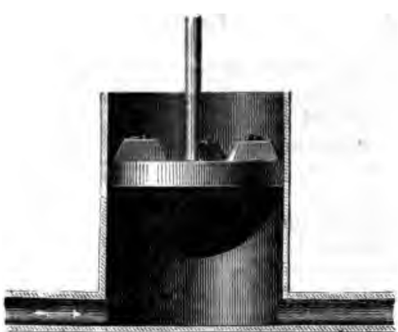


Fig. 471.

On se sert encore des machines soufflantes pour produire l'aérage des mines. A cet effet, on installe une machine de ce genre à l'orifice du puits par lequel on veut faire descendre l'air puisé

dans l'atmosphère, pour établir un courant destiné à parcourir les galeries souterraines, et à remonter par un autre puits. Mais les machines soufflantes employées pour l'aérage des mines diffèrent de celles qui sont destinées à lancer l'air dans les fourneaux, en ce que les premières doivent faire mouvoir une grande quantité de gaz avec une faible vitesse, tandis que les autres sont destinées à communiquer une vitesse considérable à une quantité de gaz beaucoup moins grande.

§ 398. **Ventilateurs.** — Supposons que l'on fasse tourner rapidement, à l'intérieur d'un cylindre, et autour de son axe, des palettes disposées de manière à entraîner avec elles l'air au milieu duquel elles se meuvent. Cet air, prenant ainsi un mouvement rapide de rotation, donnera lieu au développement de forces centrifuges (§ 110) qui tendront à l'éloigner de l'axe du cylindre, pour l'accumuler vers sa surface. Si le cylindre est fermé de toutes parts, la pression ne restera pas la même dans toute l'étendue de la masse d'air qu'il contient ; cette pression diminuera dans le voisinage de l'axe, et augmentera dans les points qui en sont les plus éloignés. Les choses étant dans cet état, si l'on vient à établir une communication de l'atmosphère avec la partie centrale du cylindre, et à pratiquer une ouverture qui permette à l'air accumulé vers la surface de s'échapper, il se produira un mouvement continuel du gaz, qui entrera par le centre, et sortira par la circonférence. La machine ainsi obtenue est ce que l'on nomme un *ventilateur*.

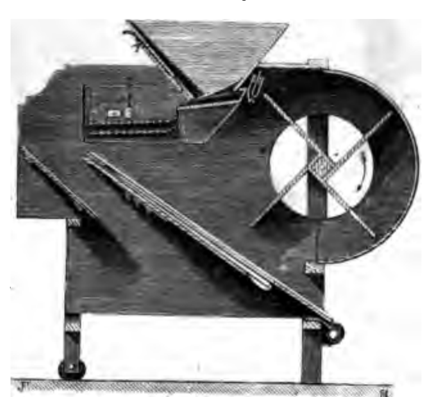


Fig. 472.

Quelquefois les palettes du ventilateur sont planes, et dirigées suivant des rayons du cylindre dans lequel elles se meuvent. On en a un exemple dans le *tarare* (fig. 472), dont on se sert pour nettoyer les grains. Le courant d'air déterminé par la rotation des palettes a ici pour objet d'entraîner les poussières et les débris de paille, afin de les séparer du grain, qui ne cède pas aussi

facilement à l'action du courant, en raison de ce que, à égalité de surface, il est beaucoup plus pesant.

Les figures 473 et 474 représentent le ventilateur qui est habituellement employé comme machine soufflante pour lancer de l'air dans les fourneaux des usines. Ses palettes sont légèrement courbées en sens contraire du sens dans lequel elles se meuvent, afin qu'elles abandonnent plus facilement l'air avec lequel elles sont en contact au moment où elles passent devant le tuyau de dégagement que l'on voit au haut de la figure 473. Les ventila-

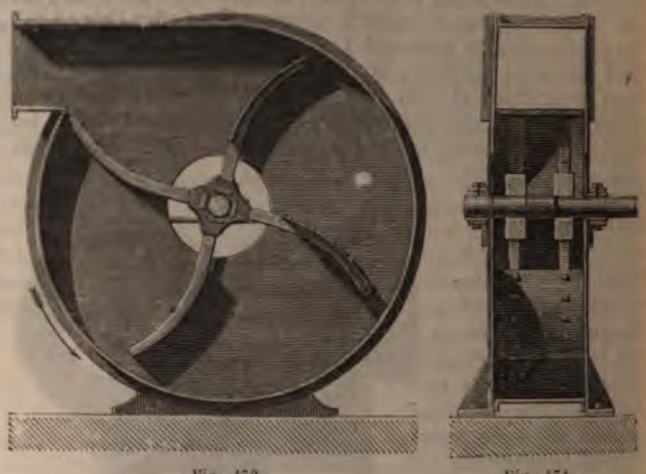


Fig. 473. Fig. 474.

teurs de ce genre reçoivent ordinairement un mouvement extrêmement rapide. Ils projettent l'air avec une grande régularité dans le tuyau avec lequel ils sont mis en communication.

On se sert quelquefois d'un ventilateur pour aspirer l'air d'un puits de mine, afin de déterminer le courant nécessaire à l'aérage de la mine. Pour cela, on installe l'appareil à l'orifice même du puits, ou bien à l'orifice d'un large conduit qui est mis en communication avec ce puits, et l'on fait en sorte que l'air du puits se rende librement vers le centre du ventilateur, tandis que sa circonférence est ouverte de toutes parts dans l'atmosphère. Les figures 475 et 476 représentent un ventilateur de ce genre, dont la disposition a été indiquée par M. Combes. Les palettes sont courbes, et dirigées en sens contraire du mouvement qu'on leur donne. Cette forme des palettes a pour objet

de faire en sorte que l'air n'ait qu'une faible vitesse, au moment où il est abandonné dans l'atmosphère par la machine; l'air glissant sur les palettes, en sens contraire du sens dans lequel elles se meuvent, sa vitesse absolue, après sa sortie de la machine, ne sera que la différence entre la vitesse du ventilateur et sa vitesse propre sur les palettes. Ici les palettes ne sont pas portées par des bras fixés à l'arbre central; elles sont adaptées à un disque circulaire qui forme la face du ventilateur opposée à celle par laquelle l'air est aspiré de l'intérieur de la mine : ce disque est fixé à l'arbre, et tourne avec lui en entraînant les palettes. La pompe à force centrifuge, que nous avons décrite précédemment (§ 360), n'est autre chose que le ventilateur de M. Combes que l'on fait agir sur un liquide, au lieu de le faire agir sur un gaz.



Fig. 475.

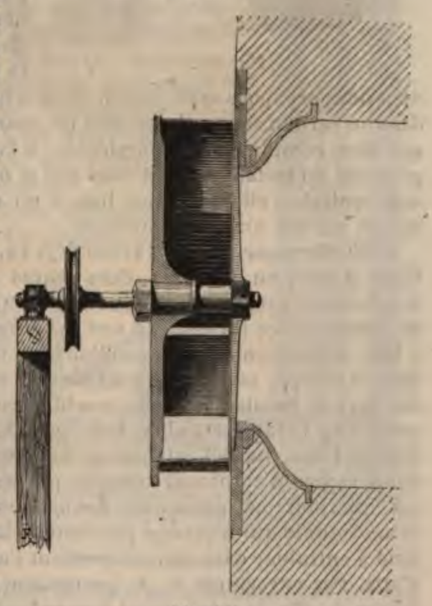


Fig. 476.

§ 399. **Vis pneumatique.** — On se sert encore quelquefois, pour l'aérage des mines, de l'appareil représenté par la figure 477, et qui consiste en une vis à large filet, mobile autour d'un axe verti-

cal à l'intérieur d'un cylindre fixe qui l'emboîte exactement. Cette vis, que l'on nomme *vis pneumatique*, a une grande analogie de forme avec l'hélice de la figure 397 (page 479), et fonctionne à peu près de la même manière. L'hélice de bateau, en tournant dans un sens convenable, détermine un mouvement de translation du bateau, et donne en même temps à l'eau qu'elle rencontre un mouvement en sens contraire. Si le bateau était fortement amarré au rivage, l'hélice ne se déplacerait plus en tournant; mais elle agirait toujours sur l'eau, et son action serait même augmentée par l'impossibilité dans laquelle elle se trouverait de céder à la pression mutuelle qui s'exerce entre sa surface et le liquide; la rotation de l'hélice donnerait donc lieu à un courant d'autant plus rapide qu'elle tournerait plus vite. C'est précisément ce que produit la vis pneumatique dont nous nous occupons maintenant. Si on la fait tourner rapidement dans un certain sens, elle produit un courant d'air ascendant, et agit ainsi comme machine aspirante, à l'orifice du puits sur lequel elle est installée. Il est clair que si on la faisait tourner en sens contraire, elle donnerait lieu à un courant descendant, et agirait comme machine soufflante.

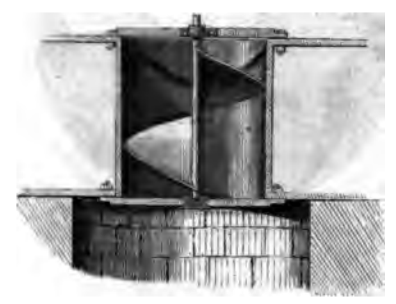


Fig. 477.

§ 400. **Trompe.** — Nous avons déjà vu, dans le bélier hydraulique (§ 390), un exemple dans lequel l'eau d'une chute agit directement pour produire du travail utile, sans que sa force ait besoin d'être transmise à une machine motrice, comme cela a lieu ordinairement; nous allons en voir un autre exemple dans la *trompe*, machine soufflante qui est très-employée dans les pays de montagne. Cette machine se compose essentiellement d'un tuyau vertical de bois (fig. 478), dans lequel on laisse tomber l'eau du bief supérieur. Le haut du tuyau est muni d'une espèce d'entonnoir conique par lequel l'eau s'introduit à son intérieur; cet entonnoir donne lieu à la formation d'une veine liquide qui n'occupe pas toute la largeur du tuyau, et qui tend à entraîner dans son mouvement l'air qui se trouve autour d'elle. Des ouvertures A, A, permettent à cet air intérieur de suivre en effet le mouvement descendant de l'eau, sans qu'il en

ılte un vide dans le haut du tuyau, puisque l'air entraîné de e manière est remplacé immédiatement par l'air extérieur, entre par ces deux ouvertures A, A. Par cette disposition, térieur du tuyau est constamment parcouru de haut en bas un mélange d'air et d'eau. Le tuyau débouche inférieurent dans une caisse fermée B. La colonne descendante vient ›riser sur une petite tablette C, destinée à faciliter la séparaı de l'air et de l'eau. L'air se loge dans le ıt de la caisse, et y possède une force élasıe supérieure à celle de l'air atmosphéıe; en vertu de cet excès de force élasti-, il se rend par le tuyau D à l'intérieur n fourneau voisin, ou bien encore dans puits de mine qu'il s'agit d'aérer. Quant eau qui tombe au fond de la caisse B, elle oule constamment au dehors, par une erture que l'on voit près de la tablette C. e jet gazeux produit par une trompe sente une très-grande régularité. Mais e machine est peu avantageuse sous le port de l'économie du travail : la quandè travail moteur qui serait strictement essaire pour produire la compression de r dans la caisse B n'est guère que les 3 du travail moteur, qui correspond à juantité d'eau dépensée.

orsque, par suite d'une explosion dans mine, on a besoin d'y produire promp-

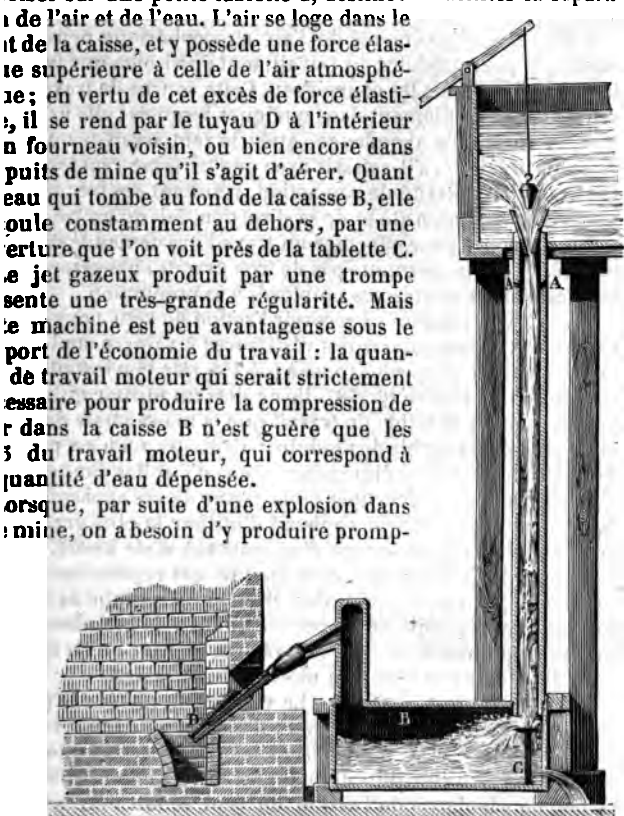


Fig. 478.

ıent un renouvellement de l'air, on a recours quelquefois à moyen qui est fondé sur le même principe que la trompe. Ce

moyen consiste à détourner le cours d'un ruisseau voisin, et à en faire couler l'eau dans le puits : cette eau entraîne avec elle une quantité d'air considérable, qui permet de descendre dans la mine pour porter secours aux ouvriers blessés, et aussi pour reprendre les travaux que l'explosion a interrompus.

EMPLOI DU VENT COMME MOTEUR.

§ 401. Les mouvements de l'air atmosphérique peuvent être employés pour produire du travail, tout aussi bien que le mouvement de l'eau dans les cours d'eau. Cette source de travail ne se rencontre pas seulement dans quelques localités; elle existe partout, et en grande abondance. Aussi le vent serait-il un moteur des plus précieux, s'il agissait avec une certaine régularité. Mais l'extrême irrégularité de son action, résultant des fréquentes variations de son intensité et de sa direction, fait qu'on ne peut pas y avoir recours pour effectuer un travail qui demande de la continuité, et qui ne permette pas de trop grands changements dans la vitesse des mécanismes employés à sa production.

Les appareils destinés à recevoir l'action du vent pour la transmettre aux pièces qui ont des résistances à vaincre sont dans les mêmes conditions que les roues à palettes que l'on installe dans le courant d'une rivière (§ 378). Ils ne doivent utiliser qu'une portion extrêmement faible du travail que la masse totale de l'air en mouvement est capable de produire : d'ailleurs, on n'est pas obligé de restreindre leurs dimensions dans d'étroites limites : aussi n'a-t-on pas à se préoccuper de la forme de ces appareils autant qu'on devrait le faire s'il s'agissait d'utiliser la plus grande portion possible de la puissance d'un courant d'air limité. La simplicité de la construction et la facilité des réparations sont les conditions principales qu'on doit chercher à remplir dans la disposition des appareils de ce genre. Quant à la grandeur du travail qu'ils pourront utiliser, elle variera suivant qu'on leur donnera des dimensions plus ou moins considérables.

§ 402. **Navires à voiles.** — Le vent est le moteur le plus employé dans la navigation sur mer; il a même été le seul pendant bien longtemps, et ce n'est que dans le siècle actuel que l'action de la vapeur lui a été substituée dans un certain nombre de navires. Le peu de régularité de l'action du vent se fait nécessairement sentir dans la marche du navire, qui lui emprunte sa force motrice. Tantôt le calme de l'atmosphère l'oblige à rester dans une immobilité presque complète pendant un temps plus ou moins long; tantôt, au contraire, la violence du vent l'expose aux plus

grands dangers. D'un autre côté, lorsque la vitesse du vent ne sort pas des limites qui conviennent à une bonne navigation, sa direction est souvent très-différente de celle de la route que l'on veut suivre.

Pour qu'un navire puisse recevoir du vent l'action qui est nécessaire à sa marche, on le surmonte d'un grand appareil de mâts et de cordages, destiné à porter les *voiles* sur lesquelles le vent doit exercer sa pression. Ces voiles sont de grandes surfaces de toile, qui peuvent se développer et se replier à volonté, et auxquelles on peut donner des directions différentes, suivant les besoins. Si le navire doit se mouvoir précisément dans la direction du vent, et dans le même sens que lui, il est clair qu'il suffit de disposer les voiles de manière que leurs surfaces soient perpendiculaires à l'axe du navire : le vent, venant les rencontrer de face, exerce sur elles une pression qui est dirigée dans le sens de cet axe, et qui détermine un mouvement de progression dans le même sens. Mais si la direction du vent n'est pas la même que celle du chemin qu'on veut parcourir, on est obligé de donner aux voiles une position oblique par rapport à la longueur du navire, et, en outre, de faire en sorte que le vent arrive obliquement sur leur surface. Le vent, en glissant sur les voiles, exerce sur elles une pression qui leur est toujours perpendiculaire, et qui a, en conséquence, une direction différente de celle du mouvement de l'air; d'un autre côté, la marche du navire n'ayant pas lieu exactement dans le sens de sa longueur, et le gouvernail étant tourné plus ou moins dans un sens convenable (§ 329), il en résulte une résistance du liquide qui est oblique par rapport à la direction de cette marche. Si l'on observe que la résultante des pressions que l'air exerce sur le navire, pressions qui sont supportées en très-grande partie par les voiles, doit constamment avoir la même direction que la résistance opposée par le liquide, on verra que les deux causes qui viennent d'être signalées concourent pour produire une obliquité plus ou moins grande de la direction du mouvement du navire sur celle du vent qui le détermine.

En agissant convenablement sur la position des voiles et sur le gouvernail, on peut faire en sorte que cette obliquité devienne très-grande ; on peut même arriver à faire marcher le navire en sens contraire du vent. Quand on remonte, pour ainsi dire, le courant d'air qui produit le mouvement du navire, en cherchant à faire faire à la direction de ce mouvement le plus petit angle possible avec la direction d'où vient le vent, on dit qu'on marche *au plus près du vent*; l'angle formé par ces deux directions peut être ré-

duit jusqu'à 65°, et même 60° dans les circonstances les plus favorables. En marchant ainsi au plus près, tantôt d'un côté du vent, tantôt de l'autre, de manière à faire des zigzags, on parvient à se transporter en définitive exactement en sens contraire du vent : c'est ce que l'on appelle *louvoyer*.

§ 403. **Moulins à vent.** — La force du vent est employée depuis un temps immémorial pour faire mouvoir des moulins à farine, auxquels on donne le nom de *moulins à vent*. La figure 479 montre la disposition de ces machines. Un arbre AB, susceptible de tourner sur lui-même, dans les coussinets qui le supportent, est disposé dans la direction même du vent. Il fait un angle de 10 à 15 degrés avec l'horizon. Cette inclinaison a été adoptée, parce



Fig. 479.

que l'on a observé que le mouvement de l'air n'est généralement pas horizontal, mais que sa direction fait ordinairement un petit angle avec la surface de la terre. Quatre bras sont fixés à cet arbre, à son extrémité A, perpendiculairement à sa longueur, de manière à former une sorte de croix; chacun de ces bras sert d'axe à une surface à peu près rectangulaire C, beaucoup plus longue que large, qui est destinée à recevoir l'action du vent, et que l'on nomme une *aile*. On donne souvent aux ailes une largeur de 2 mètres, et une longueur de 11 mètres; l'extrémité la plus rapprochée de l'arbre AB en est à une distance de 2 mètres : ce qui fait que l'espèce de roue formée par l'ensemble des quatre ailes a un diamètre de 26 mètres. Chaque aile est formée de barreaux de bois qui sont implantés transversalement de distance en distance dans la pièce de bois qui lui sert d'axe, et dont les extrémités sont reliées par deux autres pièces de bois, s'étendant parallèlement à l'axe, dans toute la longueur de l'aile. Le châssis à jour ainsi construit a une grande analogie de forme avec une échelle à montants parallèles, qui serait fixée à l'axe de l'aile par les milieux de ses divers barreaux. Des toiles, ou voiles, s'étendent à volonté sur toute l'étendue de ce châssis, de manière à le transformer en une surface continue destinée à arrêter l'air dans son mouvement, et par conséquent à recevoir la pression qui doit en résulter.

Les surfaces des ailes ne sont pas dirigées dans le plan perpendiculaire à l'arbre AB qui contient leurs axes; elles présentent une certaine inclinaison sur ce plan, de manière à recevoir obliquement l'action du vent, dont la direction est la même que celle de l'arbre AB. Il est aisé de se rendre compte de la nécessité de cette obliquité des ailes sur la direction de l'arbre AB. Si une aile avait sa surface perpendiculaire à AB, elle recevrait l'action du vent en face, et en éprouverait une pression dirigée de la même manière que le vent, c'est-à-dire parallèlement à l'arbre AB; cette pression tendrait à repousser l'aile en arrière, à faire glisser l'arbre AB dans le sens de sa longueur, mais elle ne tendrait nullement à le faire tourner dans un sens plutôt que dans l'autre. Si la surface de l'aile était, au contraire, dirigée parallèlement à AB, le vent ne la rencontrerait que par sa tranche, et elle n'en éprouverait qu'une action extrêmement faible, qui d'ailleurs ne tendrait pas davantage à faire tourner l'arbre AB. Tandis que, si l'on donne à l'aile une certaine inclinaison sur l'arbre, la pression qu'elle éprouve de la part du vent, étant toujours perpendiculaire à sa surface, sera également oblique par rapport à l'arbre AB, et en conséquence cette pression tendra à le faire tourner

dans un certain sens. Les inclinaisons des diverses ailes sont disposées de manière que les pressions supportées par chacune d'elles tendent toutes à faire tourner l'arbre AB dans un même sens.

L'obliquité de la surface des ailes sur la direction de l'arbre AB n'est pas ordinairement la même dans toute la longueur de chacune d'elles; cette obliquité va en diminuant depuis l'extrémité de l'aile située près de l'arbre, jusqu'à l'autre extrémité : en sorte que l'aile présente une surface qui n'est pas plane, mais qui est légèrement gauche. Dans les moulins bien construits, la partie de l'aile qui est la plus rapprochée de l'arbre fait un angle de 60 degrés avec la direction de cet arbre, et la partie la plus éloignée fait avec cette direction un angle de 80 degrés. Ce changement d'obliquité, d'un point à un autre de l'aile, est motivé par la vitesse plus ou moins grande avec laquelle ses divers points se meuvent en même temps. Il ne nous sera pas difficile de reconnaître qu'en effet cette différence de vitesse nécessite une différence d'inclinaison de la surface. Soit MN (fig. 480), la portion de surface de l'aile que nous considérons. Admettons que le vent se meuve dans le sens de la flèche *f*, et que la surface MN, tournant autour de l'arbre du moulin, qui est dirigé suivant la même flèche *f*, se meuve au contraire suivant la direction perpendiculaire à la première indiquée par la flèche *f'*. Si, pendant que la surface MN passe dans la position M'N', une molécule d'air située d'abord en N peut parcourir précisément le chemin NM', en vertu de sa vitesse propre, il est clair que cette molécule ne sera pas gênée par la surface MN, qu'elle ne fera que glisser le long de cette surface, et qu'en conséquence elle n'exercera sur elle aucune action. Pour que la surface MN puisse recevoir une pression de la part du vent, il faut que la vitesse des molécules d'air soit capable de leur faire parcourir un chemin plus grand que MN', pendant que la surface MN passe à la position M'N'; on voit en effet que, dans ce cas, cette surface gênera le mouvement de l'air, et que, par suite, l'air réagira en tendant à accroître la vitesse de la surface qu'il rencontre. Si nous attribuons successivement à MN des vitesses de plus en plus grandes, pour une même vitesse



Fig. 480.

du vent, cette surface mettra un temps de plus en plus petit pour passer à la position M'N'; pendant ce temps les molécules d'air parcourront, en vertu de leur vitesse propre, des chemins de plus en plus petits. Donc, pour que ces chemins surpassent toujours NM', et que par conséquent le vent exerce toujours une pression sur la surface MN, il faut que NM' soit de plus en plus petit, à mesure que MN marche plus vite; ou, en d'autres termes, il faut que MN s'approche de plus en plus d'être perpendiculaire à la direction du vent, ou bien à la direction de l'axe du moulin, qu'on suppose être la même. Or, les diverses parties d'une même aile, situées à des distances de plus en plus grandes de l'arbre tournant, sont précisément dans le cas que nous venons de supposer; elles marchent de plus en plus vite, et doivent cependant recevoir l'action d'une masse d'air qui a partout la même vitesse: donc il faut que l'inclinaison de ces diverses parties sur la direction de l'arbre diminue en raison de l'augmentation de leur vitesse.

Le mouvement de rotation imprimé par le vent à l'arbre AB (fig. 479), se transmet au mécanisme intérieur du moulin, par l'intermédiaire d'une roue dentée D fixée à cet arbre, et d'une lanterne E avec laquelle engrène la roue D; la lanterne est montée sur l'axe même de la meule courante F (§ 150). Toute la machine est portée par une forte pièce de bois verticale GH, autour de laquelle elle peut tourner comme sur un pivot. Un long levier K est fixé au moulin, et sert à l'orienter; en appliquant une force de traction à l'extrémité de ce levier, on fait tourner tout le moulin autour de GH, et l'on amène ainsi l'arbre AB à être dirigé du côté d'où vient le vent. Pour faciliter cette manœuvre, on adapte souvent, à l'extrémité du levier K, un petit treuil (§ 54) sur lequel s'enroule une corde, dont on fixe l'extrémité libre sur le sol, à une certaine distance. En faisant tourner le treuil, on tend à amener la corde pour l'enrouler sur son contour: mais, comme son extrémité est fixe, et qu'elle ne peut pas céder à la force de traction qui lui est appliquée, c'est le treuil qui marche, en entraînant avec lui le levier K, et par suite le moulin.

L'appareil moteur d'un moulin à vent, composé de l'arbre AB, et des ailes C, C, est très-souvent employé pour faire mouvoir d'autres mécanismes, tels que des scieries (§ 152), des vis hollandaises (§ 341), etc. On a conservé par extension le nom de *moulin à vent* à cet appareil en lui-même, quel que soit le genre de travail auquel il est employé.

§ 404. Lorsqu'un moulin à vent ne doit pas marcher, on serre les voiles, en les rapprochant de l'axe de chaque aile. De cette manière, les surfaces des ailes sont à jour, et ne donnent plus de prise

au vent. Pour remettre la machine en mouvement, après



Fig. 481.

avoir dirigé l'arbre moteur dans le sens du vent, il suffit d'écarter les voiles, afin de garnir de nouveau les ailes. Pour effectuer ces opérations, on amène successivement chaque aile au bas du chemin qu'elle parcourt en tournant, et on la maintient immobile dans cette position, pendant qu'on monte sur ses barreaux comme sur une échelle, soit pour tendre les voiles, soit pour les serrer. On parvient à maintenir les ailes dans l'immobilité, au moyen d'un frein analogue à celui que représente la figure 200 (page 192). Ce frein est formé d'un grand cercle de bois qui entoure la roue D (fig. 479); une de ses extrémités est fixe; l'autre extrémité est attachée à un fort levier qui, par son seul poids, suffit pour serrer le cercle sur le contour de la roue, et pour s'opposer à ce qu'elle prenne le moindre mouvement. Pendant la marche de la machine, ce levier est soulevé, et supporté par un crochet qui l'empêche d'agir sur le frein.

On voit que la manœuvre, qui a pour objet de tendre ou de serrer les voiles qui couvrent les ailes d'un moulin, n'est pas très-commode ; elle exige un certain temps, et en outre elle expose celui qui l'exécute à des dangers assez grands, surtout lorsqu'il s'agit de soustraire rapidement le moulin à l'action du vent qui devient trop violent. D'un autre côté, on ne peut pas songer à serrer plus ou moins les voiles à chaque instant, suivant que le vent est plus ou moins fort ; et cependant il serait bon de pouvoir le faire, pour ne pas fatiguer inutilement la machine, et pour éviter qu'elle ne prenne un mouvement trop rapide. C'est pour faire disparaître ces divers inconvénients que M. Berton a imaginé récemment un système particulier d'ailes dont l'usage se répand de plus en plus, et qui permet de faire varier à volonté pendant la marche du moulin l'étendue des surfaces qui reçoivent l'action du vent. La figure 481 représente la disposition qu'il a adoptée. L'arbre moteur du moulin est muni, comme dans les moulins ordinaires, de quatre bras A, qui lui sont perpendiculaires, et qui doivent former les axes des ailes. Mais ces ailes, au lieu d'être des surfaces à jour que l'on recouvre de toiles à volonté, sont formées d'un certain de lattes C, qui se recouvrent en partie, et qui déterminent ainsi une surface oblique à la direction de l'arbre du moulin. Ces lattes, qui ont une grande analogie avec celles dont se composent les jalousies, sont attachées, au moyen de brides D, à des traverses E. Les traverses E sont elles-mêmes fixées en divers points des bras A, mais de manière à pouvoir tourner autour de leurs points d'attache, et faire des angles plus ou moins aigus avec la direction des bras A. Les brides D sont également mobiles autour de leurs points d'attache avec les traverses E. Quatre tringles à crémaillère N sont liées à articulation par une de leurs extrémités aux premières traverses de chaque aile ; elles engrènent d'ailleurs avec un même pignon denté, situé à l'extrémité de l'arbre du moulin. Ce pignon est fixé à un axe qui traverse l'arbre dans toute sa longueur, et qui se termine, à l'autre bout

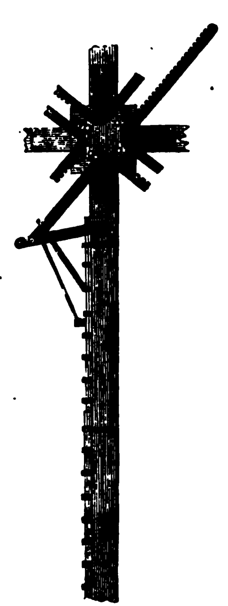


Fig. 482.

de l'arbre, par une manivelle à l'aide de laquelle on peut le faire tourner facilement dans l'ouverture longitudinale qui le contient. En agissant sur la manivelle, on donne à l'axe qui la porte et au pignon fixé à l'autre extrémité de cet axe, un mouvement de rotation dans un sens ou dans l'autre. Les crémaillères N se trouvent ainsi tirées ou poussées d'une certaine quantité; cela fait varier en conséquence l'inclinaison des traverses E sur les bras A, et il en résulte que les lattes C se recouvrent plus ou moins ou en d'autres termes que les ailes présentent une largeur plus ou moins grande. En faisant tourner la manivelle d'une quantité suffisante, et dans un sens conveuable, on parvient même à amener les lattes C à se superposer complétement; en sorte que les ailes se présentent comme si elles étaient réduites à leurs bras (fig. 482).

On voit que l'élargissement ou le rétrécissement des ailes imaginées par M. Berton s'effectue avec la plus grande facilité de l'intérieur du moulin, et même pendant que la machine fonctionne. On peut donc sans peine, et aussi souvent qu'on le veut, mettre la largeur des ailes en rapport avec la vitesse du vent qui agit sur elles. Ce système d'ailes présente cependant un défaut: c'est que la surface de chaque aile est également inclinée sur la direction du vent dans toute sa longueur. D'après ce que nous avons dit, les parties extrêmes des ailes ne doivent recevoir que peu d'action de la part du vent, si toutefois elles en reçoivent. A égalité de surface, les ailes dont il s'agit doivent produire moins de travail que les ailes dont la surface est inégalement inclinée sur l'arbre en ses divers points.

On a reconnu que la marche d'un moulin à vent qui donne lieu à la production de la plus grande quantité de travail est celle pour laquelle le nombre de tours des ailes, en une minute, est double du nombre de mètres parcourus par le vent en une seconde.

§ 405. M. Amédée Durand s'est beaucoup occupé, depuis un certain nombre d'années, d'utiliser la force du vent pour faire mouvoir des pompes destinées à élever de l'eau. Nous avons représenté ici (fig. 483 et 484), l'appareil auquel il s'est arrêté et qui a donné d'excellents résultats.

La roue qui reçoit directement l'action du vent est formée de six ailes; cette roue est montée à l'extrémité d'un arbre horizontal AB, et le tout est mobile autour d'un arbre vertical BC. Lorsque ce moulin à vent fonctionne, le vent souffle dans le sens BA. On conçoit dès lors que, si la direction du vent vient à changer, le courant d'air tendant continuellement à repousser le

centre A de la roue le plus loin possible dans le sens de son action, l'arbre AB doit tourner autour de BC de manière à se placer suivant la nouvelle direction du vent. Ainsi le moulin s'oriente de lui-même.

Pour que la machine puisse être complétement abandonnée à elle-même, sans qu'on ait besoin de s'en occuper autrement que pour graisser de temps en temps ses diverses articulations, il faut encore qu'elle soit disposée de manière à ne pas se briser sous l'action des coups de vent très-violents qui se produisent de temps en temps. Après divers essais, M. Durand s'est arrêté à la disposition suivante. La charpente de chaque aile consiste essentiellement en un bras solide implanté dans une pièce de fonte qui occupe le centre A de la roue, et en une vergue DE, articulée en D sur ce bras, de manière à pouvoir tourner librement dans toutes les directions autour du point D. Une voile de toile s'étend le long du bras, depuis la vergue DE, à laquelle elle est attachée, jusqu'à une petite distance du centre de la roue. En raison de l'articulation des vergues, les six voiles peuvent tourner autour des bords par lesquels elles touchent les bras, de manière à se placer, soit dans le plan de la roue, comme sur la figure 484, soit perpendiculairement à ce plan, comme sur la figure 483, soit dans toute autre position comprise entre ces positions extrêmes. A côté de chaque vergue se trouve une pièce DF solidement implantée dans le bras, tout près de l'articulation D. Une chaîne, qui part du milieu de la vergue DE, va passer sur une poulie adaptée à l'extrémité F de la pièce FD, suit cette pièce dans toute sa longueur, passe sur une seconde poulie en D, marche tout le long du bras de l'aile jusqu'au centre de la rue, et enfin passe sur une troisième poulie de renvoi pour aller se terminer à un manchon G auquel elle est fixée. Ce manchon G, auquel aboutissent les six chaînes pareilles à celles dont il vient d'être question et correspondant aux six ailes de la roue, peut glisser le long de l'arbre AB, et tourne en même temps que lui. Une autre chaîne, attachée à ce manchon G, va passer sur la poulie de renvoi H, et supporte un contre-poids K; le mode d'attache du manchon G avec cette dernière chaîne est d'ailleurs tellement disposé, que le manchon puisse tourner avec l'arbre AB sans que la chaîne tourne sur elle-même. L'action du contre-poids K tend constamment à reporter le manchon G vers l'extrémité B de l'arbre AB, et par suite à appliquer les diverses vergues DE le long des pièces DF, comme on le voit sur la figure 484, où toutes les voiles sont placées dans le plan de la roue. Mais lorsque le vent souffle suivant BA, les six voiles sont repoussées et prennent chacune une certaine obliquité sur le plan de la roue; elles en-

traînent ainsi les vergues, qui tirent les chaînes auxquelles elles sont attachées, font marcher le manchon G vers le point A, et par suite font monter le contre-poids K. Plus le vent est fort, plus les voiles s'éloignent de la position de repos qu'indique la figure 484; et lorsqu'elles sont soumises à un vent violent, elles s'effacent complétement, comme on le voit sur la figure 483.

Lorsqu'on veut soustraire les ailes à l'action du contre-poids K, on fait remonter un peu ce contre-poids à l'aide d'une autre chaîne qui passe sur une

Fig. 483. (*Échelle de 11 millimètres pour mètre.*)

poulie située en B et qui vient s'enrouler sur un petit treuil L.

Pour transmettre le mouvement du moulin au piston d'une

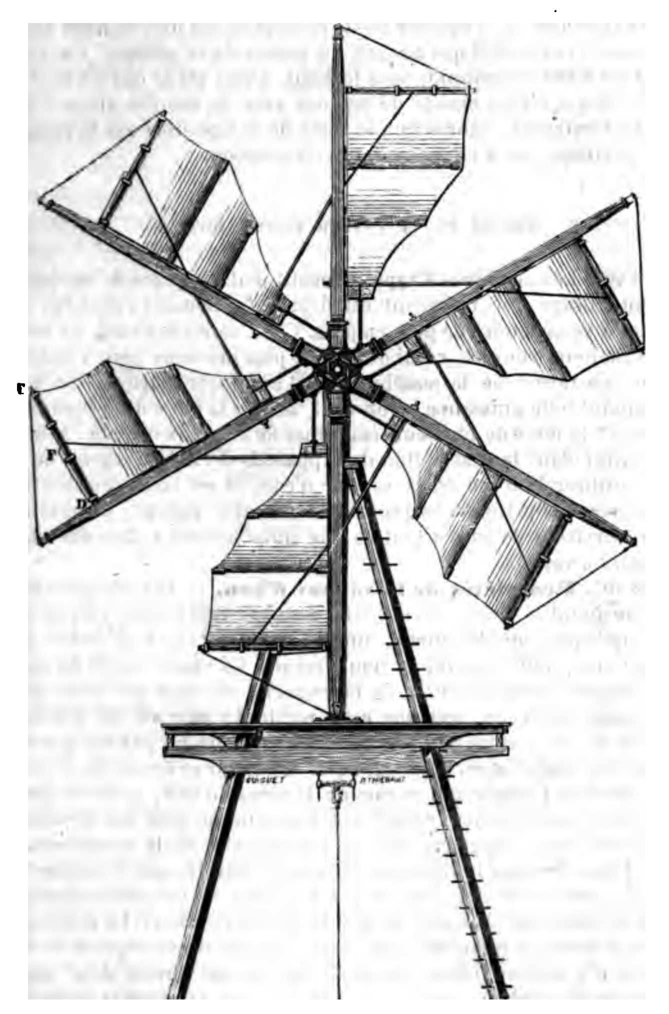


Fig. 484

ompe à eau, il suffit d'adapter à l'extrémité B de l'arbre AB

une manivelle qui en tournant fasse monter et descendre alternativement une bielle à laquelle elle est articulée: le mouvement de va-et-vient de cette bielle détermine un mouvement analogue de la tige MM qui aboutit au piston de la pompe. La tige MM est d'ailleurs munie, vers le haut, d'une pièce qui permet à tout ce qui est au-dessus de tourner avec le moulin autour de l'axe vertical BC, tandis que le reste de la tige ainsi que le piston ne participe pas à ce mouvement de rotation.

EMPLOI DE LA VAPEUR COMME MOTEUR.

§ 406. Les machines à vapeur constituent un genre de moteurs dont l'usage encore récent est déjà extrêmement répandu, et tend à se répandre de plus en plus. C'est, sans contredit, de tous les moteurs connus, celui qui est le plus précieux pour l'industrie, en raison de la possibilité de l'employer partout, en lui donnant telle puissance qu'on veut, depuis la force d'un homme, jusqu'à la force de plusieurs centaines de chevaux-vapeur. Avant d'entrer dans la description des appareils à l'aide desquels on a pu utiliser la force de la vapeur d'eau, il est indispensable de rappeler les principales propriétés de cette vapeur, propriétés qui serviront de base à tout ce que nous aurons à dire des machines à vapeur.

§ 407. **Propriétés de la vapeur d'eau.** — Lorsqu'une certaine quantité d'eau est contenue dans un vase fermé, qu'elle ne remplit pas complétement, une portion de l'eau se réduit en vapeur, quelle que soit sa température. La vapeur ainsi formée se répand dans la partie de la capacité du vase qui n'est pas occupée par l'eau, soit que cette partie du vase ait été d'abord vide de toute manière, soit qu'elle contienne un gaz tel que de l'air atmosphérique. A mesure que la vapeur se forme et s'accumule dans l'espace qui surmonte la masse d'eau, sa force élastique s'y accroît; mais cette force élastique ne peut pas dépasser une certaine limite, qui dépend uniquement de la température de l'eau. Dès que la vapeur a attéint cette limite, que l'on appelle sa *tension maximum*, il ne se produit plus de nouvelle vapeur; on dit alors que l'espace où elle se trouve est *saturé*. La présence d'une certaine quantité d'air dans l'espace où se répand la vapeur n'a aucune influence sur la tension maximum dont nous venons de parler; cet air n'influe que sur la rapidité avec laquelle la vapeur se forme. Si l'espace qui surmonte l'eau est vide de toute matière, le liquide se vaporise avec une rapidité ex-

trême, et la vapeur acquiert presque instantanément sa tension maximum; si au contraire cet espace contient de l'air, la vapeur ne se forme que peu à peu, et se répand de même dans la capacité qui lui est offerte, en s'infiltrant pour ainsi dire entre les molécules de l'air. Dans ce dernier cas, la force élastique de l'atmosphère gazeuse qui se trouve en contact avec l'eau est à chaque instant égale à la somme de la force élastique de l'air et de celle de la vapeur d'eau que l'air renferme.

Si le vase qui contient de l'eau est ouvert, de manière à communiquer librement avec l'atmosphère, l'eau se vaporisera également; mais la vapeur formée, se répandant au dehors, ne pourra pas atteindre la tension maximum qui convient à la température de l'eau, et la vaporisation continuera indéfiniment, jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'eau. La tension maximum de la vapeur est de plus en plus grande, à mesure que la température est plus élevée; la rapidité avec laquelle l'eau qui communique directement avec l'atmosphère se réduit en vapeur, croît également avec la température. Lorsque la température est assez élevée pour que la tension maximum de la vapeur d'eau soit égale à la pression atmosphérique, la vaporisation de l'eau s'effectue rapidement. Dans ce cas, la vapeur n'a plus besoin de s'infiltrer peu à peu dans les interstices compris entre les molécules de l'air; elle a la force de vaincre la pression exercée par l'atmosphère sur la surface de l'eau, et de repousser l'air pour se faire un passage au dehors. Des bulles de vapeur se forment alors dans toute la masse liquide, et viennent se rendre tumultueusement à la surface, pour se répandre dans l'atmosphère; la masse d'eau est *en ébullition*. En général, l'eau se met en ébullition toutes les fois que la tension maximum de la vapeur, correspondant à sa température, n'est pas inférieure à la pression que le liquide éprouve sur sa surface, de la part de l'atmosphère qui la surmonte, de quelque nature que soit cette atmosphère, qu'elle soit formée de gaz, ou de vapeur, ou de l'un et de l'autre mélangés dans une proportion quelconque.

§ 408. Lorsqu'une certaine quantité de vapeur d'eau est contenue dans un espace fermé, dans lequel il n'y a pas d'eau, et que sa tension est inférieure à la tension maximum qui correspond à sa température, cette vapeur se comporte exactement comme un gaz. Si l'on fait varier son volume, sa force élastique varie en même temps, conformément à la loi de Mariotte (§ 249), pourvu que cette force élastique reste toujours assez faible pour que l'espace qui contient la vapeur n'en soit pas saturé. Mais supposons que l'on diminue assez le volume de la vapeur pour

que sa force élastique devienne égale à sa tension maximum correspondant à sa température; si l'on continue à la comprimer, sa force élastique n'augmentera plus: elle restera égale à la tension maximum, et une portion de la vapeur se condensera en repassant à l'état liquide. Si ensuite on augmente l'espace dans lequel la vapeur peut se répandre, l'eau provenant de la condensation repassera à l'état de vapeur, en entretenant la force élastique égale à la tension maximum, tant qu'il restera encore du liquide; mais, à partir du moment où l'eau se sera transformée tout entière en vapeur, une nouvelle augmentation de l'espace qui lui est offert sera accompagnée d'une diminution dans la force élastique de la vapeur, qui reprendra ainsi les propriétés des gaz.

§ 409. Si une masse de vapeur est contenue dans un espace dont les divers points ne sont pas à la même température, sa force élastique ne peut pas être supérieure à la tension maximum qui correspond à la plus basse des températures des divers points de cet espace. On conçoit en effet que, s'il en était autrement, la force élastique de la masse de vapeur devant être la même en ses divers points, pour qu'il y ait équilibre, on aurait, au point où la température est le plus basse, une certaine quantité de vapeur dont la tension surpasserait la plus grande tension que puisse avoir la vapeur en ce point, ce qui est impossible. Si, par une circonstance quelconque, une masse de vapeur est mise en communication avec un espace dont la température corresponde à une tension maximum inférieure à la tension de cette vapeur, il se produit rapidement une condensation d'une partie de la vapeur, jusqu'à ce que la vapeur restante satisfasse à la condition qui vient d'être énoncée. Cette condensation s'effectue précisément dans les points où la température est le plus basse.

§ 410. Des expériences nombreuses ont été faites pour déterminer la valeur de la tension maximum de la vapeur d'eau à diverses températures. Nous citerons entre autres celles de Dulong et Arago, qui ont été faites dans des limites très-étendues, et qui ont été reprises récemment par M. Regnault. Le tableau qui suit est un extrait des résultats obtenus par ce dernier savant; il fait connaître la tension maximum de la vapeur d'eau, pour les températures de 10 en 10 degrés, depuis 0° jusqu'à 330°. Les tensions sont exprimées par les hauteurs des colonnes de mercure auxquelles elles feraient équilibre:

TEMPÉRATURE	TENSION de la vapeur.	TEMPÉRATURE.	TENSION de la vapeur.	TEMPÉRATURE	TENSION de la vapeur.
d.	m.	d.	m	d.	m.
0	0,0046	80	0,3546	160	4,6516
10	0,0092	90	0,5254	170	5,7617
20	0,0174	100	0,7600	180	6,5464
30	0,0315	110	1,0754	190	9,4427
40	0,0549	120	1,4913	200	11,6890
50	0,0920	130	2,0303	210	14,3248
60	0,1488	140	2,7176	220	17,3904
70	0,2331	150	3,5812	230	20,9254

On voit par ce tableau que la tension maximum de la vapeur d'eau croît avec la température, et qu'elle croît avec une rapidité qui augmente de plus en plus, à mesure que la température s'élève. On peut y remarquer aussi que la tension maximum de la vapeur d'eau, à la température de 100°, est mesurée par une colonne de mercure de 0m,76, la même qui fait équilibre à la pression atmosphérique normale (§ 245); c'est ce qui doit avoir lieu, d'après ce que nous avons dit il n'y a qu'un instant, relativement à l'ébullition, puisque la température de 100° est par définition celle de l'ébullition de l'eau, sous une pression mesurée par une colonne de mercure de 0m,76 de hauteur.

La force élastique de la vapeur, dans les machines à vapeur, étant habituellement indiquée en atmosphères (§ 245), il est important de connaître la température pour laquelle la tension maximum de la vapeur est égale à un nombre donné d'atmosphères. C'est pour cela que nous donnerons encore le tableau suivant, qui est déduit des résultats obtenus par M. Regnault, et qui contient les températures correspondantes aux tensions de 1 à 28 atmosphères.

TENSION DE LA VAPEUR.	TEMPÉRATURE.	TENSION DE LA VAPEUR.	TEMPÉRATURE.
atm.	d.	atm.	d.
1	100,0	15	198,8
2	120,6	16	201,9
3	133,9	17	204,9
4	144,0	18	207,7
5	152,2	19	210,4
6	159,2	20	213,0
7	165,3	21	215,5
8	170,8	22	217,9
9	175,8	23	220,3
10	180,3	24	222,5
11	184,5	25	224,7
12	188,4	26	226,8
13	192,1	27	228,9
14	195,5	28	230,9

§ 411. Le passage de l'eau à l'état de vapeur exige une quantité de chaleur considérable, qui est employée uniquement à produire le changement d'état, sans que la température varie; c'est ce que les physiciens nomment la *chaleur latente de la vaporisation*. Lorsque ensuite la vapeur se condense, et revient à l'état liquide, elle dégage cette même quantité de chaleur, qui devient sensible par l'élévation de température des corps avec lesquels cette vapeur est en contact. Il résulte de là que plusieurs des phénomènes qui viennent d'être indiqués ne se passent pas aussi simplement qu'on pourrait le croire au premier abord, par le motif que la vaporisation de l'eau et la condensation de la vapeur sont toujours accompagnées d'une tendance à un changement considérable de température.

Une masse d'eau qui se vaporise plus ou moins rapidement, et qui n'est pas en communication avec une source de chaleur, éprouve nécessairement un abaissement de température. La tension maximum de la vapeur qui se forme au-dessus du liquide n'est donc pas celle qui correspond à la température qu'il avait tout d'abord; elle est plus faible, en raison du refroidissement que le liquide éprouve à mesure que la vaporisation s'effectue. Une certaine quantité d'eau, ayant une température de 100 degrés, se mettra en ébullition si elle communique librement avec l'atmosphère; mais l'ébullition cessera aussitôt, parce que la

température du liquide s'abaissera rapidement au-dessous de 100 degrés, par suite de la formation de la vapeur. Aussi, pour entretenir l'ébullition, est-il nécessaire de fournir constamment de la chaleur à la masse d'eau; et la quantité de vapeur qui se forme dans un temps donné est plus ou moins considérable, suivant que la chaleur que l'on restitue à l'eau dans le même temps est elle-même plus ou moins grande.

On conçoit d'après cela qu'il est très-important de connaître la quantité de chaleur que nécessite la vaporisation d'une masse d'eau déterminée, et cela pour les diverses températures auxquelles on peut avoir à effectuer cette vaporisation. C'est pour cela que nous donnerons encore le tableau suivant, déduit, comme les deux autres, des recherches faites par M. Regnault sur les propriétés de la vapeur d'eau.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR saturée.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale.	TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR saturée.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale.
0°	606,5	606,5	120°	522,3	643,1
20	592,6	612,6	140	508,0	649,2
40	578,7	618,8	160	493,6	655,3
60	564,7	624,8	180	479,0	661,4
80	550,6	630,9	200	464,3	667,5
100	536,5	637,0	220	449,4	673,6

La deuxième colonne de ce tableau fait connaître la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un kilogramme d'eau de l'état liquide à l'état de la vapeur à saturation, sans qu'il y ait de changement dans la température, qui, après la vaporisation comme avant, est celle indiquée par la première colonne. La troisième colonne donne la quantité de chaleur nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau, prise à la température de 0°, en vapeur saturée à la température indiquée par le nombre correspondant de la première colonne. L'unité de chaleur est, comme on sait, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'eau de 0° à 1°.

§ 412. **Historique de l'invention des machines à vapeur.** — L'invention des machines à vapeur étant une des plus importantes qui aient été faites dans les temps modernes, on a

cherché naturellement à qui on devait en attribuer l'honneur. Nous allons indiquer rapidement les principaux résultats de ces recherches historiques, en prenant pour guide l'intéressante notice qu'Arago a publiée à ce sujet dans l'*Annuaire du Bureau des longitudes*.

L'*éolipyle*, inventé par Héron d'Alexandrie, paraît être le premier exemple de l'emploi de la vapeur comme force motrice. Pour s'en faire une idée, il suffit de se reporter à l'appareil à réaction représenté par la figure 453 (page 559). Dans cet appareil, l'écoulement de l'eau par des tuyaux convenablement recourbés détermine un mouvement de rotation du vase qui renferme le liquide. Si ce vase contenait de la vapeur au lieu d'eau, et que la force élastique de cette vapeur fût capable de la faire sortir avec une certaine vitesse par les tuyaux recourbés, il se produirait également un mouvement de rotation : tel est le principe de l'éolipyle. La disposition indiquée par Héron est un peu différente. Son appareil consiste en une boule métallique creuse, pouvant tourner autour d'un diamètre horizontal, et munie de deux tuyaux recourbés qui partent des extrémités d'un autre diamètre perpendiculaire au premier. Quoi qu'il en soit, la machine de Héron n'a rien de commun avec nos machines à vapeur, et ne peut pas même en être considérée comme une première ébauche ; le mode d'action de la vapeur y est essentiellement différent.

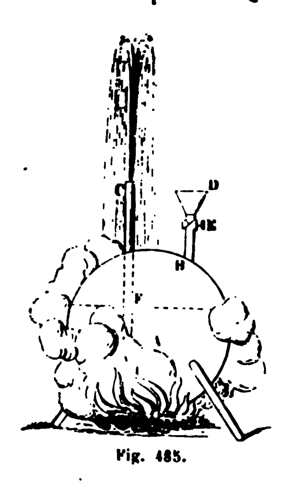


Fig. 485.

Salomon de Caus, Français de naissance, est le premier qui ait indiqué (en 1615) la vapeur d'eau comme pouvant agir par pression pour produire l'élévation de l'eau. L'appareil qu'il décrit se compose d'un ballon de cuivre A (fig. 485), muni des deux tubes B, C, dont le premier B sert à l'introduction de l'eau, et le second C sert à la sortie du liquide sous l'action de la vapeur. Le tube B se termine par un entonnoir D, et est garni d'un robinet E. Lorsqu'on a versé de l'eau dans le ballon jusqu'au niveau F, on ferme le robinet E, et l'on place l'appareil sur un foyer. La vapeur qui se forme ne peut pas sortir par le tuyau B, qui est fermé ; elle ne peut pas s'échapper non plus par le tuyau C, qui plonge dans l'eau, au-dessous du niveau F : elle acquiert

donc, dans le haut du ballon, une tension de plus en plus grande qui oblige l'eau à monter dans le tuyau C, et à sortir sous forme de jet.

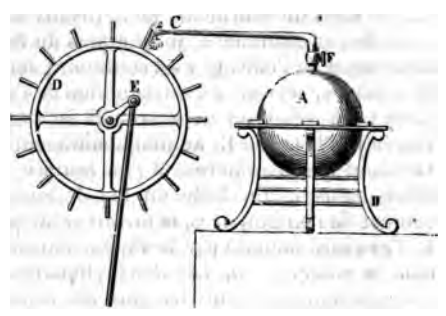


Fig. 486.

L'Italien Branca a décrit (en 1629) une machine qui a beaucoup d'analogie avec l'éolipyle de Héron, quant au mode d'action de la vapeur. Un ballon A (fig. 486), dans lequel on introduit de l'eau, est placé sur un réchaud B; la vapeur formée s'échappe par un tuyau C, et vient frapper les palettes d'une roue D; le mouvement de rotation de la roue, produit par l'action de la vapeur, peut être appliqué à la production d'un travail utile par l'intermédiaire d'une manivelle E, fixée à l'une des extrémités de son axe. La machine de Branca ne peut, pas plus que l'éolipyle de Héron, être regardée comme étant l'origine des machines à vapeur.

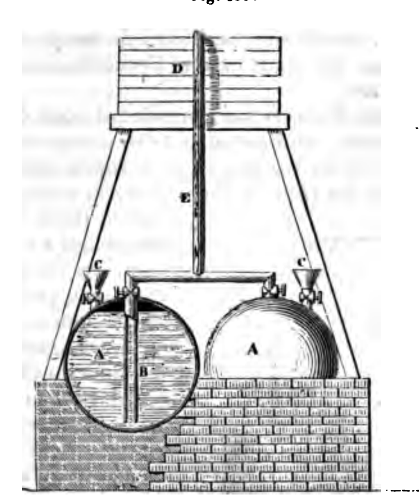


Fig. 487.

En Angleterre, le marquis de Worcester a publié (en 1663) un ouvrage dans lequel il parle d'un moyen qu'il a inventé pour élever l'eau à l'aide du feu. Il se contente d'en donner une idée succincte, sans figure. Celle qui se trouve ici (fig. 487), a été disposée d'après la *courte description* qu'on lit dans son ouvrage

Deux chaudières sphériques A, A sont placées à côté l'une de l'autre dans un fourneau ; deux tuyaux B descendent dans chacune de ces chaudières, jusque près du fond, et sont destinés à l'ascension de l'eau qui y est contenue ; deux entonnoirs C, munis de robinets, servent à l'introduction de l'eau dans chaque chaudière ; un réservoir supérieur D est destiné à recevoir l'eau élevée par le tuyau E, auquel aboutissent les deux tuyaux B qui viennent des chaudières. Si l'on remplit d'eau l'une des chaudières, puis qu'on fasse du feu dessous, après avoir fermé le robinet de l'entonnoir C, et ouvert celui qui est au haut du tuyau B, l'eau sera poussée par la vapeur dans le tuyau E, et s'élèvera dans le réservoir D. Les deux chaudières doivent fonctionner alternativement. Cette machine est évidemment la même que celle de Salomon de Caus, avec un perfectionnement qui consiste dans l'emploi de deux chaudières au lieu d'une seule, et qui a pour but d'éviter les pertes de temps occasionnées par le remplissage des chaudières et l'échauffement de l'eau qu'on y a introduite.

§ 413. Dans les machines de Salomon de Caus et du marquis de Worcester, une partie de l'eau introduite dans les chaudières se réduisait en vapeur, et cette vapeur agissait par pression sur la surface du reste de l'eau, pour la refouler dans un tuyau d'ascension. Denis Papin, né à Blois, est le premier qui ait eu l'idée de faire agir la vapeur sur un piston destiné à recevoir sa pression, pour l'employer à vaincre une résistance. Voici en quoi consiste la machine proposée par Papin en 1690. Un cylindre A (fig. 488), fermé par le bas, et ouvert par le haut, contient un piston B qui peut se mouvoir dans toute sa hauteur. On n'introduit le piston dans le cylindre qu'après y avoir versé préalablement une petite quantité d'eau. Une ouverture C, pratiquée dans le piston, permet de l'abaisser jusqu'à ce que sa face inférieure touche l'eau contenue dans le cylindre, en laissant échapper l'air qui se trouve au-dessous de lui. Cela étant fait, on ferme l'ouverture C au moyen d'une tige M, et l'on fait du feu sous le fond du cylindre A. L'eau, s'échauffant de plus en plus, arrive bientôt à une température pour laquelle la tension maximum de la vapeur est ca-

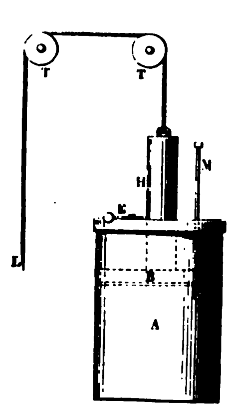


Fig. 488.

pable de surmonter la pression atmosphérique (§ 407); alors le piston B, étant plus fortement pressé sur sa face inférieure que sur sa face supérieure, doit monter jusqu'au haut du cylindre. Si l'on arrête le piston dans cette nouvelle position, au moyen d'un cliquet E que l'on introduit dans une échancrure de la tige H, puis que l'on enlève le feu, le cylindre se refroidit, la vapeur qu'il contient se condense, et le piston n'est presque plus soumis qu'à la pression atmosphérique, dont une faible portion seulement est équilibrée par la vapeur qui reste encore. Il suffit alors de retirer le cliquet E, pour que le piston descende sous l'action de cette pression; et si l'on suspendait un poids à la corde L, qui passe sur les poulies T, et qui vient s'attacher à la tige H du piston, ce poids pourrait être élevé par le mouvement ainsi produit. On pourrait d'ailleurs recommencer la même opération, autant de fois qu'on voudrait, avec la même quantité d'eau.

Cette machine a été essayée en petit par Papin. On y voit le principe de la machine atmosphérique, dont nous parlerons bientôt.

§ 414. Le capitaine Savery (en 1689) est l'auteur de la première machine qui ait été appliquée en grand pour l'élévation de l'eau. Cette machine a beaucoup d'analogie avec celles que Salomon de Caus et le marquis de Worcester avaient indiquées précédemment; toutefois elle en diffère en ce que la vapeur n'est pas formée par une portion de l'eau à élever, mais par une masse d'eau séparée qui est seule soumise à l'action d'un foyer. Un fourneau A

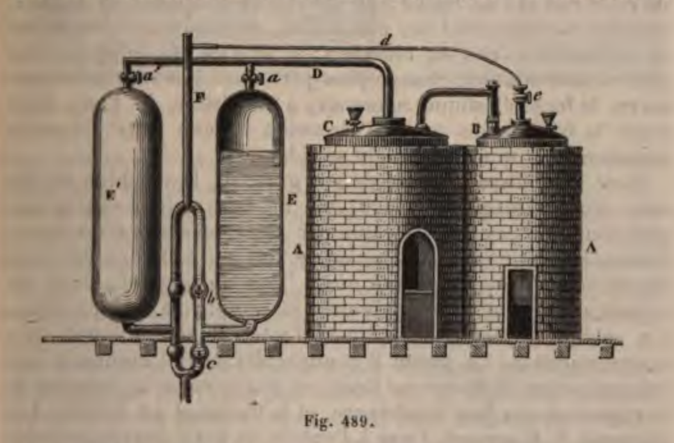


Fig. 489.

(fig. 489), contient deux chaudières fermées B, C, qui communi-

quent l'une à l'autre. La vapeur qui se forme dans ces chaudières se rend dans le tuyau D, peut passer de là dans l'un ou l'autre des récipients E, E', suivant qu'on ouvre le robinet *a*, ou le robinet *a'*. Ces récipients étant pleins d'eau, on conçoit que, au moment où l'on ouvre le robinet *a*, la vapeur presse l'eau contenue en E, et la fait monter par le tuyau d'ascension F, en ouvrant la soupape *b*. Lorsque le récipient E est vide, on ferme le robinet *a*, et l'on ouvre le robinet *a'*; c'est alors l'eau du récipient E' qui est refoulée dans le tuyau d'ascension F. Pendant ce temps, le récipient E se refroidissant, la vapeur qu'il contient se condense, et le vide ainsi formé détermine l'élévation de l'eau du réservoir inférieur, qui ouvre la soupape *c*, et vient remplir de nouveau le récipient E. On voit donc qu'il suffit d'ouvrir et de fermer alternativement les robinets *a*, *a'*, pour que la machine fonctionne. Un tuyau *d*, qui s'embranche en un point du tuyau d'ascension F, vient aboutir à l'une des chaudières, et est habituellement fermé par un robinet *e*; ce tuyau sert à remplir les chaudières d'eau, lorsqu'elles se sont vidées par la production de la vapeur.

Dans cette machine de Savery, l'eau qu'il s'agit d'élever n'est pas contenue dans les chaudières, comme cela avait lieu dans celles de Salomon de Caus et de Worcester, mais elle ne s'en échauffe pas moins. Aussitôt que la vapeur est mise en communication avec l'un des récipients E, E', elle se condense au contact de cette eau qui est froide; de nouvelles quantités de vapeur, arrivant constamment des chaudières, se condensent de même en réchauffant l'eau du récipient; et ce n'est que lorsque cette eau est suffisamment chaude pour permettre à la vapeur de conserver la force élastique nécessaire à l'élévation de l'eau dans toute la hauteur du tuyau d'ascension F, que cette élévation commence, et que le récipient se vide.

Pour faire disparaître ce défaut grave de la machine de Savery, Papin imagina, en 1707, de ne faire agir la vapeur par pression sur l'eau à élever que par l'intermédiaire d'un piston flottant sur cette eau, ainsi qu'on le voit sur la figure 490. Une chaudière sphérique communique, par un tuyau L, avec un cylindre I qui doit alternativement se remplir et se vider d'eau. Un robinet C permet d'établir et d'intercepter à volonté cette communication. Le piston H contient des parties creuses N qui lui permettent de flotter sur l'eau; ce piston reçoit la pression de la vapeur sur sa face supérieure, et la transmet au liquide. Les soupapes B, E servent, l'une à l'entrée de l'eau dans le cylindre I, l'autre à sa sortie de ce cylindre. On voit, au sommet de la

chaudière, une soupape sur laquelle s'appuie un levier D, chargé d'un poids F à son extrémité libre : c'est la *soupape de sûreté*, dont Papin est l'inventeur, et qui a pour objet de s'opposer à ce que la vapeur prenne une trop forte tension dans la chau-

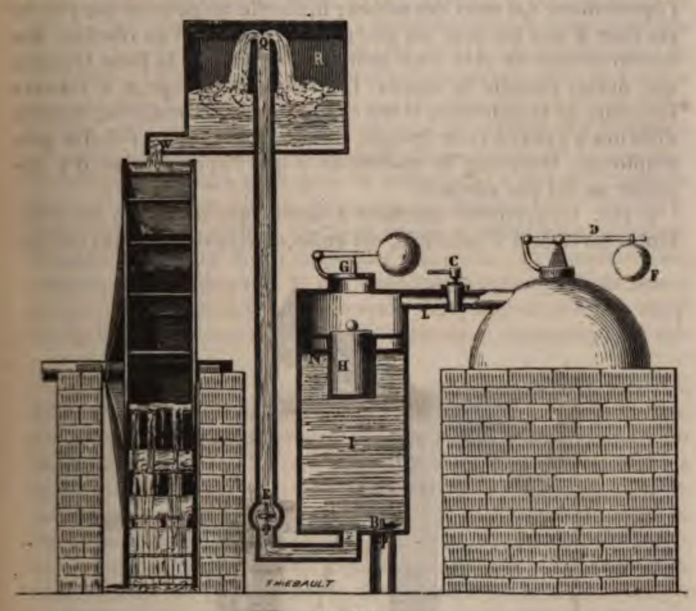


Fig. 490.

dière ; on en voit encore une autre G au haut du cylindre I. Nous avons déjà vu une soupape de ce genre dans la presse hydraulique (§ 369); mais ce n'est qu'une imitation de la soupape de sûreté des chaudières à vapeur, qui était employée depuis longtemps, lorsque la première presse hydraulique a été construite.

Papin ne s'est pas contenté d'ajouter un piston flottant à la machine de Savery : il a voulu que sa machine, au lieu de servir uniquement à élever de l'eau, pût devenir un moteur capable de faire mouvoir tels mécanismes qu'on voudrait. Pour cela il faisait déboucher son tuyau d'ascension, en Q, dans une caisse R, fermée de toutes parts, excepté en W, où se trouvait une ouverture permettant au liquide de s'écouler pour tomber sur une roue hydraulique; l'eau sortait de la caisse R avec une vitesse

qui était beaucoup augmentée par la compression de l'air situé au-dessus d'elle, et faisait ainsi tourner la roue, en agissant à la fois par sa vitesse et par son poids.

Savery avait annoncé sa machine comme pouvant servir à l'épuisement des eaux des mines ; mais elle ne pouvait pas élever ces eaux à une hauteur un peu grande, sans qu'il en résultât des inconvénients de plus d'un genre, par suite de la forte tension que devait prendre la vapeur. Les fuites de la vapeur à travers les joints de la machine, et les explosions des chaudières, étaient difficiles à éviter à cette époque. Aussi cette machine fut-elle peu employée. D'ailleurs la modification que Papin proposa d'y apporter ne fut pas adoptée.

§ 415. La première machine à vapeur qui ait rendu de véritables services à l'industrie, est celle de Newcomen, qui est habituellement désignée sous le nom de *machine atmosphérique*.

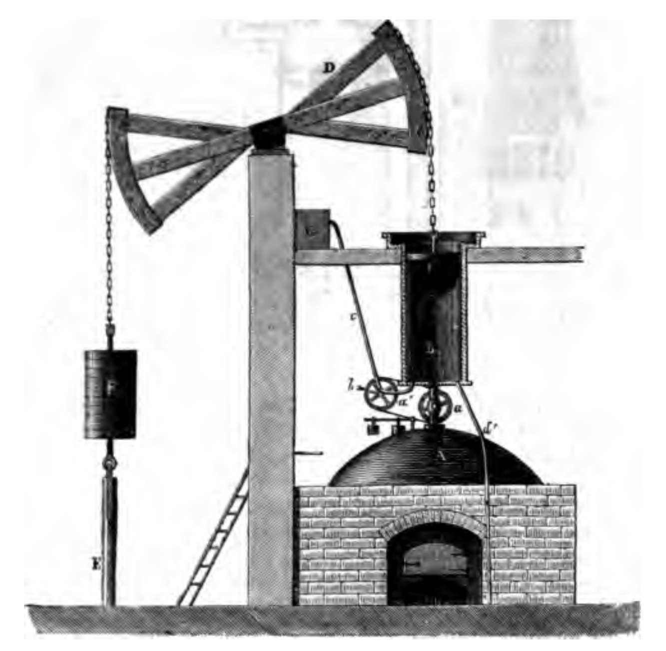


Fig. 497.

Cette machine date de 1705. Elle n'est, à proprement parler, que la réalisation de l'idée émise par Papin en 1690 (§ 413).

La figure 491 fait connaître la disposition de cette machine qui a été employée à l'épuisement des eaux des mines, et qui l'est même encore dans certaines localités. Une chaudière A est destinée à la production de la vapeur; elle a la forme d'un hémisphère terminé inférieurement par un fond plat, et est munie d'une soupape de sûreté. La vapeur formée dans la chaudière peut se rendre dans le cylindre B par un tuyau qui les réunit. Un robinet, dont la tête est formée d'une espèce de roue *a*, est adapté à ce tuyau, et permet d'établir et d'intercepter alternativement la communication de la chaudière avec le cylindre. Le piston C, mobile dans le cylindre B, est attaché par une chaîne à l'une des extrémités d'un balancier D, qui peut tourner autour de son milieu. L'autre extrémité de ce balancier supporte, au moyen d'une chaîne, une longue tige E, qui descend dans un puits de mine, et qui est destinée à y faire mouvoir des pompes : c'est la maîtresse tige dont nous avons parlé à l'occasion des pompes de mines (§ 358).

Lorsque le robinet *a* est ouvert, la vapeur presse le piston C de bas en haut, et fait équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce sur sa face supérieure; la tige E peut alors descendre en vertu de son poids et du poids additionnel F, en faisant remonter le piston C jusqu'au haut du cylindre B. Si l'on vient alors à fermer le robinet *a*, et à déterminer par un moyen quelconque la condensation de la vapeur contenue en B, la pression atmosphérique, qui agit sur la face supérieure du piston C, n'est plus contre-balancée par la tension de la vapeur; le piston redescend alors, et soulève ainsi la tige E. Cette seconde partie du mouvement du piston C peut donner lieu à la production d'une quantité de travail aussi grande qu'on veut; il suffit pour cela que la surface de ce piston ait des dimensions convenables.

Pour opérer la condensation de la vapeur dans le cylindre B, on employait d'abord un moyen dont s'était déjà servi Savery, et qui consistait à faire tomber de l'eau froide sur la surface extérieure du cylindre. Mais ce moyen n'agissait que lentement. Un jour on s'aperçut que la condensation se produisait avec une rapidité beaucoup plus grande qu'à l'ordinaire. En cherchant à se rendre compte de ce fait, on reconnut qu'il était dû à la présence de l'eau qu'on mettait sur le piston, pour s'opposer au passage de l'air ou de la vapeur entre son contour et les parois du cylindre. Une partie de cette eau passait par un petit trou dont le piston était accidentellement percé, et tombait par gouttelettes dans l'espace rempli

de vapeur; de là la condensation rapide qu'on observait. On mit à profit ce résultat important, et, à partir de ce moment, on n'opéra plus la condensation qu'au moyen d'une injection d'eau froide faite à l'intérieur de la capacité contenant la vapeur à condenser. A cet effet, un tuyau *c*, amenant l'eau froide d'un réservoir G, débouche au fond du cylindre. Un robinet muni d'une roue *a'* est adapté à ce tuyau, et permet de produire et d'interrompre à volonté l'injection d'eau froide. Une chaîne sans fin embrasse les deux roues *a*, *a'*, et fait qu'elles ne peuvent pas tourner l'une sans l'autre. Une manivelle *b*, liée à la roue *a'*, permet de faire tourner ces deux roues en même temps. Dans la position actuelle, le robinet *a* est fermé, le robinet *a'* est ouvert, et l'eau froide du réservoir G peut se rendre dans le cylindre B, pour y produire la condensation de la vapeur. Lorsque le piston C est arrivé au bas de sa course, il suffit de faire tourner la manivelle *b* en l'abaissant, pour fermer le robinet *a'* et ouvrir le robinet *a*. Alors le piston C remonte; on ramène la manivelle dans sa première position, le piston C redescend, et ainsi de suite. Une ouverture pratiquée au bas du cylindre B communique avec le tuyau *d* destiné à évacuer l'eau qui s'accumule constamment au fond du cylindre; de temps en temps on fait sortir cette eau, en ouvrant un robinet adapté au tuyau *d*.

§ 416. Dans la machine atmosphérique, la vapeur n'a pas d'autre objet que de faire équilibre à la pression atmosphérique; aussi sa tension ne doit-elle pas dépasser une atmosphère. Mais en employant la vapeur de cette manière, il faut absolument opérer sa condensation, ce qui exige qu'on ait à sa disposition une assez grande quantité d'eau. Si, au lieu de cela, on fait agir la vapeur sur un piston, en lui donnant une force élastique supérieure à celle de l'air atmosphérique, on pourra obtenir un effet analogue à celui que fournit la condensation, c'est-à-dire diminuer la tension de la vapeur, en la faisant communiquer librement avec l'atmosphère. Tel est le principe des machines dites *à haute pression, sans condensation.*

Papin est le premier qui ait construit une machine de ce genre. Leupold, qui l'a fait connaître en 1724, en a décrit une du même genre qui est représentée ici (fig. 492). Une chaudière A, destinée à la production de la vapeur, est surmontée de deux cylindres R, S, avec lesquels elle communique alternativement. Un robinet B, placé sur le passage de la vapeur, permet de la conduire, tantôt dans le cylindre R, tantôt dans le cylindre S; ce robinet fait en même temps communiquer avec l'atmosphère, par le conduit M, celui des deux cylindres qui ne reçoit pas de vapeur de la chau-

dière. Dans la position qu'indique la figure, la vapeur de la chaudière va en R, et celle qui était en S a pu s'échapper dans l'atmosphère; en faisant tourner le robinet B d'un angle droit, on fera passer la vapeur de la chaudière en S, et celle qui s'est rendue en R pourra se répandre dans l'atmosphère. Les pistons C, D, sont reliés par les tiges E, F, à deux balanciers G, H; ces balanciers sont articulés d'une autre part aux tiges K, L, de deux pompes foulantes O, P, qui puisent l'eau dans un réservoir N, et

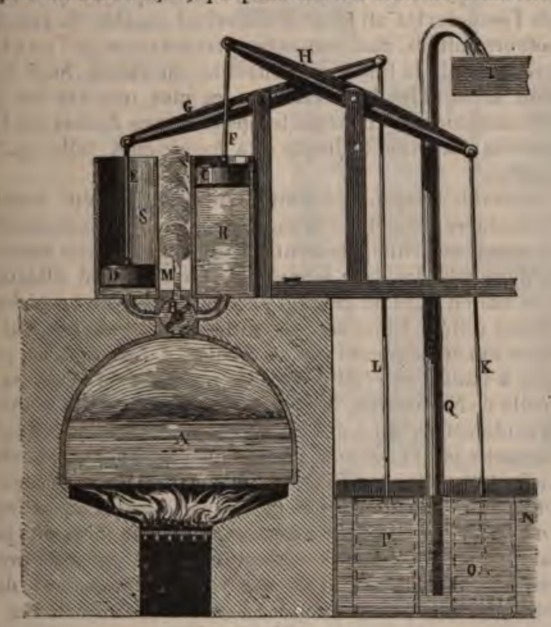


Fig. 492.

l'élèvent par un tuyau Q jusque dans un second réservoir T. Chacun des pistons C, D, est poussé du bas au haut du cylindre qui le contient, lorsqu'il est soumis à l'action de la vapeur de la chaudière; et en même temps il abaisse le piston de la pompe correspondante, en foulant de l'eau dans le tuyau Q. Lorsque ensuite la vapeur qui est au-dessous de ce piston peut s'échapper par l'ouverture M, il est également pressé sur ces deux faces, et redescend en vertu de son poids, qui l'emporte sur les résistances à vaincre.

§ 417. **Machine à vapeur de Watt à simple effet.** — Ce que nous avons dit dans les paragraphes précédents peut donner une idée de la marche progressive qu'a suivie l'emploi de la vapeur comme force motrice jusqu'en 1769. Jusque-là la machine à vapeur n'était pour ainsi dire que dans l'enfance; mais à cette époque Watt entra dans la carrière, et porta rapidement ce genre de machines à un haut degré de perfection. Entre ses mains, la machine à vapeur, qui n'avait encore été employée qu'à l'élévation de l'eau, devint un moteur universel capable de remplacer les moteurs animés, dans toutes les circonstances où l'on a besoin de développer de la force pour effectuer du travail. Nous aurons occasion de signaler les inventions les plus importantes de ce célèbre mécanicien, en même temps que nous donnerons la description des machines à simple et à double effet, telles qu'il les a disposées.

La machine à vapeur de Watt à simple effet a été construite pour remplacer la machine atmosphérique de Newcomen (§ 415). Elle se compose principalement, comme la machine atmosphérique, d'un cylindre dans lequel un piston se meut alternativement de bas en haut et de haut en bas. La tige de ce piston est également reliée à l'une des extrémités d'un balancier, qui communique son mouvement de va-et-vient à une tige de pompe attachée à l'autre extrémité. Dans la machine de Watt, comme dans celle de Newcomen, le piston doit monter dans le cylindre par la seule action du poids de la tige de pompe, action qui lui est transmise par l'intermédiaire du balancier; et le mouvement descendant de ce piston doit être produit par la différence des pressions qu'il éprouve sur sa face supérieure et sur sa face inférieure. Mais l'égalité de pression sur les deux faces du piston, pendant son mouvement ascendant, et la différence de pression sur ces deux faces, pendant son mouvement descendant, ne sont pas obtenues de la même manière dans les deux machines.

Le piston A, de la machine Watt (fig. 493), se meut dans un cylindre BB qui est fermé à ses deux extrémités. Deux ouvertures C, D, existent au haut et au bas de ce cylindre, et le font communiquer avec un large tuyau latéral EF, qui contient trois soupapes G, H, K. La vapeur qui se forme dans la chaudière est amenée par un tuyau qui aboutit en E, au-dessus de la soupape G. Après avoir produit son effet dans le cylindre, ainsi que nous allons l'expliquer, cette vapeur traverse la soupape K, et se rend, par la partie F du tuyau latéral, dans une capacité spéciale nommée le *condenseur*. Un jet d'eau froide, qui tombe sous forme de pluie dans cette capacité, au moment où la vapeur y arrive,

ait perdre pour ainsi dire instantanément sa force élastique. ur produire le mouvement du piston A dans le cylindre BB, fit d'ouvrir et de fermer alternativement les trois soupapes K. à des moments convenables. Les soupapes G et K étant rtes, et la soupape H fermée, la vapeur qui vient de la chau- se rend librement le haut du cylindre 'ouverture C, et peut exercer sa pression a face supérieure du n A; en même temps peur, qui s'était pré- mment introduite ce piston, se trouve communication di- avec le condenseur, a soupape K, et par elle ne doit avoir ne très-faible tension 09). Le piston doit descendre, si toute- a différence des pres- exercées sur ses faces est capable de cre les résistances lui sont appliquées. noment où le piston rive au bas du cylin- on ferme les soupa- , K, et l'on ouvre la ape H : alors le haut

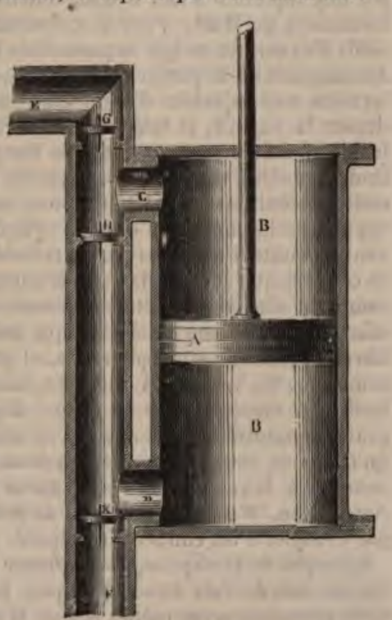


Fig. 493.

bas du cylindre communiquent l'un avec l'autre; tandis leur communication est interceptée, soit avec la chaudière, avec le condenseur. Le piston se trouve donc également pressé les deux faces, et il remonte sans difficulté, sous l'action de ge de pompe qui est suspendue à l'autre extrémité du ba- ier. Le piston A étant arrivé au haut de sa course, il suffit rmer la soupape H, et d'ouvrir les deux autres, pour que le vement descendant du piston recommence. Les trois sou- s G, H, K, sont habituellement désignées sous des noms spé- , qui rappellent l'objet de chacune d'elles, et qu'il est bon nnaître : G est la *soupape d'admission* ; H est la *soupape d'équi-* ; K est la *soupape d'exhaustion*. Une quatrième soupape, qui

laisse pénétrer un jet d'eau froide dans le condenseur, s'ouvre et se ferme en même temps que la soupape d'exhaustion.

§ 418. L'emploi d'un condenseur, c'est-à-dire d'une capacité séparée dans laquelle doit s'opérer la condensation de la vapeur par une injection d'eau froide, constitue la plus importante des inventions de Watt. Pour se convaincre de son importance, il suffit d'examiner ce qui se passe dans la machine de Newcomen. Au moment où le piston est arrivé en haut de sa course, on détermine une injection d'eau froide dans le cylindre, pour y condenser la vapeur, et faire redescendre le piston. Mais cette eau froide abaisse en même temps la température des parois du cylindre, et elle l'abaisse d'une quantité considérable. Lorsque ensuite on veut faire monter le piston, on fait arriver de nouvelle vapeur de la chaudière dans le cylindre. Cette vapeur, se trouvant en contact avec des parois refroidies, se condense aussitôt; et ce n'est que lorsque la température de ces parois s'est suffisamment élevée par cette condensation, que la vapeur conserve dans le cylindre une force élastique assez grande pour faire équilibre à la pression atmosphérique, et pour permettre au piston de remonter. On voit par là que le réchauffement des parois du cylindre, à chaque coup de piston, dépense en pure perte une grande quantité de vapeur; et l'on comprend toute l'importance qu'il y avait, sous le rapport de l'économie du combustible consommé, à faire disparaître ce grave défaut de la machine de Newcomen. Watt y est parvenu de la manière la plus heureuse, par l'emploi d'un condenseur séparé.

L'emploi de la vapeur, pour presser la face supérieure du piston, au lieu de l'air atmosphérique, permet d'exercer une plus forte pression sur un même piston. Il suffit pour cela de faire en sorte que la vapeur formée dans la chaudière prenne une force élastique supérieure à celle de l'air atmosphérique. Il en résulte que, pour construire une machine d'une puissance déterminée, il n'est pas nécessaire de donner au cylindre des dimensions aussi grandes que celles qu'on devrait lui donner, si l'on adoptait la disposition des machines de Newcomen.

Les machines de Watt à simple effet sont encore employées dans quelques localités. On en voyait encore récemment deux à Paris, dans l'établissement public connu sous le nom de *pompe à feu du Gros-Caillou;* elles servaient à élever les eaux de la Seine pour le service de la ville. Cependant nous nous contenterons d'en avoir indiqué le principe, sans entrer dans le détail de leur disposition. Nous décrirons de préférence une des machines à simple effet que l'on construit maintenant, surtout dans le comté

de Cornouailles (Angleterre), pour l'épuisement des eaux des mines, et qui ne sont autre chose que des machines à simple effet de Watt auxquelles on a apporté de notables perfectionnements. Mais avant de nous occuper de cette description, il est indispensable d'expliquer ce que l'on entend par la *détente de la vapeur.*

§ 419. **Détente de la vapeur.** — Nous avons dit que, dans la machine de Watt (fig. 493), la soupape d'admission G reste ouverte pendant tout le temps que le piston met à descendre. Pendant ce temps, la vapeur passe librement de la chaudière dans le cylindre; d'ailleurs l'ébullition de l'eau dans la chaudière fournit à chaque instant une quantité de vapeur capable de remplacer celle qui s'en va: il en résulte que la face supérieure du piston est toujours pressée de la même manière. Supposons maintenant que la soupape G ne reste ouverte que pendant une partie de la course descendante du piston. Dès le moment qu'elle sera fermée, la quantité de vapeur contenue dans la partie supérieure du cylindre ne pourra plus augmenter. Cependant celle qui s'y trouve continuera à presser le piston et à le faire descendre, mais en même temps elle se dilatera, et sa force élastique diminuera en conséquence de plus en plus, ce qui n'empêchera pas qu'elle n'amène le piston jusqu'au bas du cylindre, si la machine est convenablement disposée. Dans la première partie du mouvement descendant du piston, tant que la soupape d'admission G est ouverte, on dit que la vapeur agit *à pleine pression;* à partir du moment où la soupape d'admission est fermée, on dit que la vapeur agit *avec détente.*

Voyons maintenant quel avantage il peut y avoir à faire agir la vapeur avec détente, dans une portion de la course du piston, au lieu de la faire agir constamment à pleine pression. Supposons, pour fixer les idées, que la soupape d'admission se ferme au moment où le piston est au milieu de sa course. Il est bien clair que, dans ce cas, la vapeur ne pourra pas produire autant d'effet que si elle agissait à pleine pression pendant toute la course du piston. Mais aussi la quantité de vapeur employée ne sera que la moitié de ce qu'elle aurait été dans ce cas; la dépense en combustible devra donc être également réduite de moitié, puisque, toutes choses égales d'ailleurs, la quantité de combustible consommée est évidemment proportionnelle à la quantité de vapeur produite. Pour s'assurer s'il y a avantage à faire agir la vapeur avec détente, il suffit donc de s'assurer si, par ce moyen, on réduit la dépense dans un plus grand rapport que l'effet produit. Or c'est ce que nous reconnaîtrons sans peine. Car la quantité de *travail* (§ 77) *effectuée* par l'action de la vapeur sur le

piston, pendant la première moitié de sa course, c'est-à-dire pendant que la soupape d'admission est ouverte, est précisément égale à la moitié de celle qui aurait été effectuée par la vapeur agissant à pleine pression pendant la course entière du piston; le travail total de la vapeur, pendant toute la course du piston, surpasse donc la moitié de celui qui aurait été produit si la vapeur agissait constamment à pleine pression, de toute la quantité de travail que développe la vapeur en se détendant. Or la quantité de vapeur employée est juste la moitié de ce qu'elle aurait été dans ce cas : donc, en faisant agir la vapeur avec détente, on a diminué la dépense dans un plus grand rapport que le travail produit, ce qui est un avantage réel. Si l'on veut effectuer avec une machine à détente le même travail qu'avec une machine où la vapeur agit toujours à pleine pression, il suffira de faire le cylindre de la première plus grand que celui de la seconde, dans un rapport déterminé par le degré de détente que l'on veut produire; et la première machine, tout en étant aussi puissante que l'autre, exigera moins de vapeur, ou, ce qui revient au même, il faudra moins de combustible pour lui fournir la vapeur nécessaire à sa marche.

Pour qu'on se fasse une idée nette de l'avantage qui résulte de l'emploi de la vapeur avec détente, nous allons donner les valeurs des quantités de travail qu'une même masse de vapeur peut effectuer, suivant qu'on la fait agir en la détendant plus ou moins. Pour concevoir comment ces quantités de travail peuvent se calculer, il faut se représenter le piston soumis à des pressions de plus en plus faibles pendant que la vapeur se détend, et imaginer que la durée totale de la détente soit décomposée en un très-grand nombre de petites portions, pendant chacune desquelles la pression pourra être regardée comme constante; en multipliant la pression qui correspond à chacun de ces intervalles de temps par le chemin que parcourt le piston pendant ce temps (§ 77), et faisant la somme de tous les produits ainsi obtenus, on aura la quantité de travail effectuée pendant la détente. Il suffira d'ajouter à cette somme le travail effectué par la vapeur avant que la détente commence, pour avoir le travail total qu'elle aura produit. C'est ainsi que l'on a obtenu les nombres du tableau suivant, qui fait connaître les diverses quantités de travail qu'une même masse de vapeur peut produire, suivant qu'elle agit à pleine pression, ou bien qu'elle commence à se détendre à partir du moment où le piston a déjà parcouru les 9 dixièmes, les 8 dixièmes, les 7 dixièmes... de sa course. On a pris pour unité le travail qui est produit dans le cas où il n'y a pas de détente.

FRACTION DE LA COURSE où commence la détente.	TRAVAIL PRODUIT	FRACTION DE LA COURSE où commence la détente.	TRAVAIL PRODUIT.
1	1,000	0,5	1.693
0,9	1,105	0,4	1,916
0,8	1,223	0,3	2,204
0,7	1,357	0,2	2,609
0,6	1,509	0,1	3,302

L'idée de faire agir la vapeur avec détente est due à Watt. Mais ce n'est que postérieurement à lui qu'on en a fait l'application complète dans la construction des machines à vapeur.

§ 420. **Machine à vapeur de Cornouailles.** — La machine qui est actuellement employée dans le comté de Cornouailles, pour l'épuisement des eaux des mines, est, ainsi que nous l'avons déjà dit, la machine à simple effet de Watt, à laquelle on a apporté de notables perfectionnements, parmi lesquels on doit placer au premier rang l'emploi de la détente. La figure 494 représente l'ensemble d'une machine de ce genre. Le piston moteur se meut à l'intérieur du cylindre A. Sa tige B est articulée en C à l'une des extrémités d'un balancier CDE. Le mouvement de va-et-vient du piston donne lieu à un mouvement d'oscillation du balancier autour de son axe D, et par suite à un mouvement de va-et-vient de la tige F suspendue à l'autre extrémité de ce balancier. La tige F descend dans toute la profondeur d'un puits de mine, et doit y faire mouvoir des pompes; ce n'est autre chose que la maîtresse tige dont nous avons parlé à l'occasion des pompes de mines (§ 358). L'action de la vapeur n'a pas d'autre objet que de soulever la tige F; cette tige, en retombant ensuite sous l'action de son poids, produit le refoulement de l'eau du puits dans les tuyaux d'ascension correspondant aux divers étages de pompes.

On comprendra aisément que, dans une machine de ce genre, l'emploi de la vapeur avec détente ne doit pas seulement occasionner une économie de combustible; il en résulte encore un avantage important pour la marche de la machine. La résistance à vaincre agit avec une intensité constante, pendant tout le temps de la descente du piston moteur. Si la vapeur agissait à pleine pression, jusqu'à ce que le piston fût arrivé au bas de sa

course, il en résulterait que la puissance resterait également

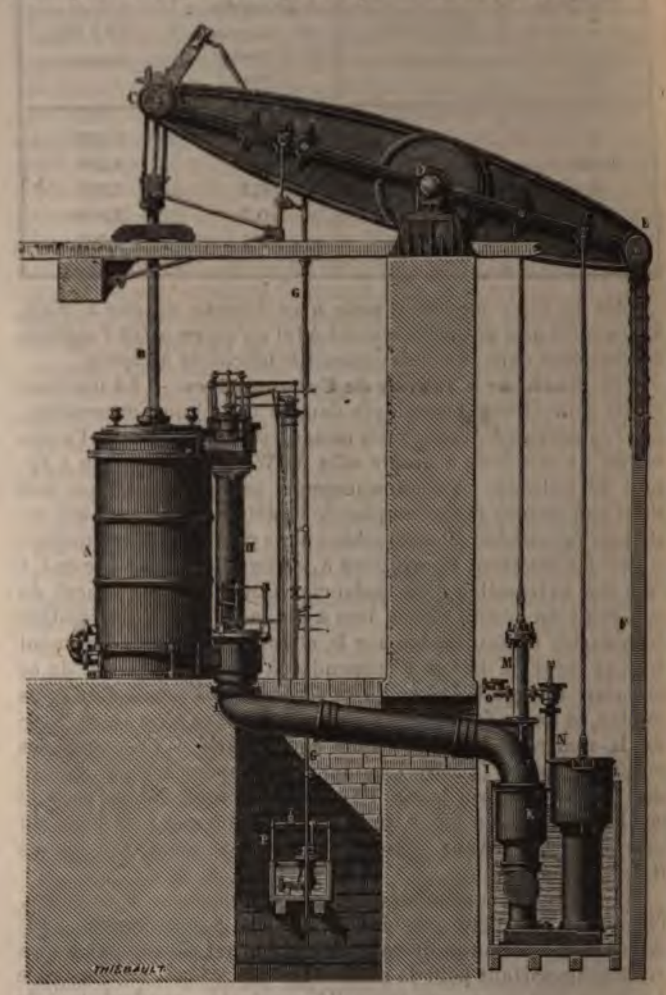


Fig. 494.

constante pendant tout ce temps. Or, la puissance doit l'emporter

sur la résistance au commencement du mouvement descendant du piston, afin de pouvoir lui donner une certaine vitesse, ainsi qu'aux diverses parties de la machine qui se meuvent en même temps que lui ; donc la puissance l'emporterait toujours de même sur la résistance pendant toute la course du piston, et, par suite, le mouvement de la machine s'accélérerait constamment ; donc enfin il en résulterait un choc du piston contre le fond du cylindre, choc que l'on doit éviter à cause des inconvénients de plus d'un genre qu'il occasionne. L'emploi de la vapeur avec détente permet de faire disparaître ce choc. On conçoit, en effet, que la pression exercée par la vapeur sur le piston étant d'abord constante, et allant ensuite en diminuant progressivement, pourra l'emporter pendant quelque temps sur la résistance à vaincre, puis bientôt devenir trop faible pour lui faire équilibre ; le mouvement du piston s'accélérera donc d'abord, pour se ralentir ensuite (§ 132), et, en conséquence, il pourra se faire que le piston n'arrive au bas de sa course qu'avec une vitesse nulle ou presque nulle.

La machine fait mouvoir d'elle-même les divers mécanismes nécessaires à sa marche. Une longue tige GG, qui est liée au balancier, et que l'on nomme la *poutrelle*, sert à ouvrir et fermer en temps convenable les soupapes d'admission, d'équilibre, et d'exhaustion, ainsi que nous l'expliquerons bientôt. Le tuyau H sert à faire communiquer le haut et le bas du cylindre A, par l'ouverture de la soupape d'équilibre, afin de permettre au piston de remonter sous l'action du poids de la tige F. Le tuyau H fait communiquer le bas du cylindre avec le condenseur K, lorsque la soupape d'exhaustion est ouverte. Le condenseur est une capacité fermée qui se trouve au milieu d'une bâche contenant de l'eau froide, et dans laquelle l'eau de la bâche pénètre constamment, sous forme de jet, par une ouverture pratiquée à cet effet.

Une pompe L, dont le piston est attaché par une longue tige au balancier CDE, sert à retirer du condenseur l'eau qui s'accumule constamment à sa partie inférieure, et qui vient soit de l'eau d'injection, soit de la vapeur condensée. A chaque coup du piston de la pompe L, la totalité de l'eau du condenseur en est retirée, et, en outre, ce piston agit vers la fin de sa course en aspirant une partie de l'air contenu dans le tuyau I et dans le condenseur K ; c'est ce qui fait que la pompe L porte le nom de *pompe à air*. Si cette pompe ne retirait du condenseur que l'eau qui y arrive constamment, il s'y accumulerait des quantités d'air de plus en plus grandes, ce qui ferait que bientôt la pression dans le condenseur ne serait pas inférieure à la pression atmosphérique ; et

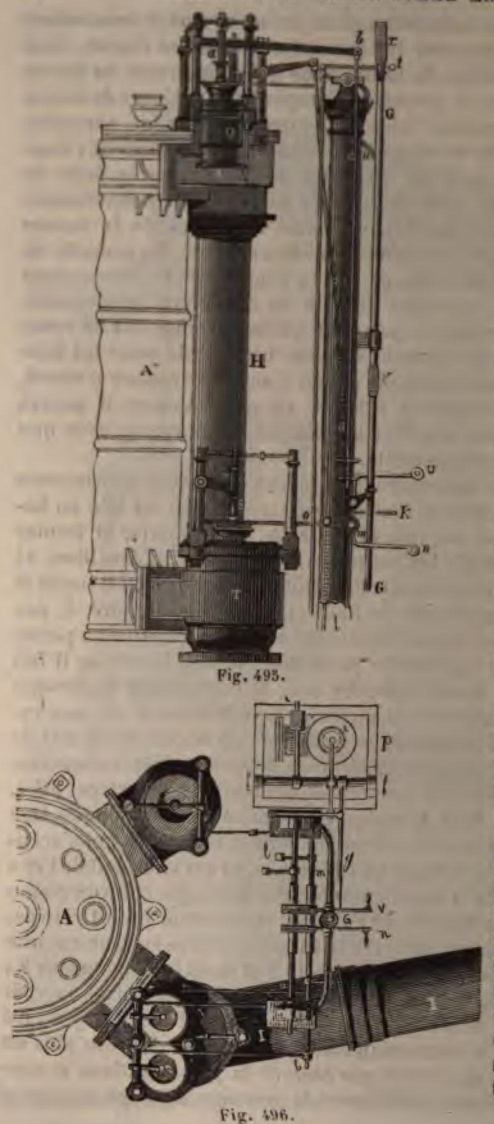


Fig. 495.

Fig. 496.

dès lors la condensation de la vapeur deviendrait inutile, puisqu'on arriverait au même résultat en la faisant dégager librement dans l'atmosphère. Cet air, que l'on a besoin de retirer du condenseur, y est amené en partie par l'eau d'injection qui en contient en dissolution, et en partie par la vapeur qui entraîne avec elle celui qui était en dissolution dans l'eau introduite dans les chaudières.

Une autre pompe M, mue également par la machine, prend, par le tuyau N, une portion de l'eau chaude que la pompe à air retire du condenseur, et la refoule dans les chaudières, par un tuyau qui s'embranche en O. Cette eau est destinée à remplacer constamment celle qui sort des chau-

dières sous forme de vapeur, afin d'y maintenir toujours une même quantité d'eau. La pompe M est désignée sous le nom de *pompe alimentaire*.

§ 421. Voyons maintenant de quelle manière les soupapes peuvent être alternativement ouvertes et fermées par la machine elle-même. Pour cela nous nous servirons des figures 495 et 496 dont la première est la reproduction, à une plus grande échelle, de la partie de la figure 494, où se trouvent les mécanismes que nous voulons décrire, et la seconde est un plan de cette même partie de la machine.

On voit en Q une capacité cylindrique dans laquelle est située une première soupape destinée à modérer plus ou moins le passage de la vapeur de la chaudière dans le cylindre, suivant que la résistance à vaincre par l'action de la vapeur est plus ou moins grande. Cette soupape, que l'on nomme *soupape modératrice*, ne doit pas s'ouvrir ni se fermer pendant la marche de la machine; elle doit conserver constamment la position qu'on lui a donnée tout d'abord, pour que le mouvement descendant du piston ne s'effectue ni trop lentement ni trop rapidement. La tige *a* de cette soupape traverse le fond supérieur de la boîte Q qui la contient; un levier *bc*, fixé à l'axe *c*, permet de faire tourner cet axe sur lui-même, et de soulever plus ou moins la tige *a*, au moyen d'un autre levier que porte le même axe; enfin une tringle *dd*, articulée à l'extrémité du levier *bc*, s'abaisse jusqu'à la portée du conducteur de la machine, qui peut faire monter ou descendre son extrémité inférieure, de manière à donner une ouverture convenable à la soupape modératrice.

C'est en *z*, au-dessous de la boîte Q, que s'embranche le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière dans la machine. La vapeur traverse donc de bas en haut l'ouverture de la soupape modératrice. De là elle se rend dans la boîte R de la soupape d'admission, qui est placée à côté de la précédente, et pénètre dans le haut du cylindre, lorsque cette soupape est ouverte. Après avoir agi sur le piston pour le faire descendre, elle sort du haut du cylindre A par la boîte S de la soupape d'équilibre, située au haut du tuyau H, et se rend par ce tuyau dans le bas du même cylindre, pendant que le piston remonte. Enfin la soupape d'exhaustion, située en T, vient à s'ouvrir, et la vapeur passe du cylindre dans le tuyau H qui la mène au condenseur.

Lorsque le piston est sur le point de descendre, il faut que la soupape d'exhaustion s'ouvre d'abord, puis que la soupape d'admission s'ouvre quelques instants plus tard, pour que, dans l'intervalle, la vapeur contenue dans le bas du cylindre ait le temps

de se condenser en grande partie. Le piston ayant déjà parcouru une fraction de sa course descendante, la soupape d'admission doit se fermer, pour que la vapeur n'agisse plus qu'avec détente : tandis que la soupape d'exhaustion ne doit se fermer que lorsque le piston est arrivé au bas de sa course. Alors la soupape d'équilibre s'ouvre ; le piston remonte jusqu'au haut du cylindre, et la machine ne ferme cette soupape que lorsque le piston doit s'arrêter. Les soupapes d'exhaustion et d'admission s'ouvrant de nouveau, le piston recommencera à descendre, et ainsi de suite.

On pourrait disposer la machine de manière à lui faire ouvrir les soupapes d'exhaustion et d'admission en même temps qu'elle ferme la soupape d'équilibre, c'est-à-dire au moment où le piston arrive à la fin de sa course ascendante ; par cette disposition le piston redescendrait immédiatement, et la machine fonctionnerait d'une manière continue. Mais, au lieu de cela, on a cherché à produire le mouvement du piston d'une manière intermittente, c'est-à-dire à laisser la machine en repos pendant un temps plus ou moins long, après chaque double course descendante et ascendante du piston. C'est la nature du travail spécial qu'effectuent les machines dont nous nous occupons, qui a conduit à produire cette intermittence dans leur mouvement. Les pompes mues par la maîtresse tige F doivent épuiser l'eau contenue dans le puits, à mesure qu'elle y arrive par les fissures du terrain, et par les galeries souterraines qui aboutissent au puits; on conçoit donc que ces pompes n'ont pas besoin de fonctionner constamment, mais que leurs pistons ne doivent donner pendant chaque heure qu'un nombre de coups réglé sur la quantité d'eau qui se rend pendant ce temps au bas du puits.

Pour arriver à produire ce mouvement intermittent de la machine à vapeur, on ne fait pas ouvrir les soupapes d'exhaustion et d'admission par la machine elle-même, mais par un appareil spécial, que l'on voit en P (fig. 494 et 496), et auquel on donne le nom de *cataracte*. Cet appareil se compose essentiellement d'une pompe à eau *e*, qui est installée au milieu d'une bâche remplie d'eau. La tige du piston de cette pompe est reliée à un levier fixé à un axe horizontal *ff*; un autre levier *g* est également fixé à cet axe, de l'autre côté. Au moment où le piston de la machine à vapeur arrive vers le bas de sa course, la poutrelle GG abaisse le levier *g*, fait tourner l'axe *ff* sur lui-même d'une certaine quantité, et soulève ainsi le piston de la pompe *e*. Une soupape qui est au fond du corps de pompe *e* s'ouvre de dehors en dedans, et laisse passer l'eau de la bâche, qui remplit ce corps de pompe. Lorsque le piston de la machine à vapeur remonte,

le piston de la cataracte ne se trouve plus soumis à l'action de la poutrelle GG, et il tend à redescendre en vertu de son poids, et aussi en vertu du contre-poids i fixé à un levier qui fait corps avec l'axe ff. Mais l'eau qui s'est introduite dans le corps de pompe de la cataracte ne peut en sortir que par une ouverture qu'on rend à volonté plus ou moins étroite ; il en résulte que le piston ne peut descendre que lentement, en faisant sortir l'eau par cette ouverture. Le levier g se relève donc aussi lentement. C'est ce mouvement ascendant du levier g que l'on utilise pour ouvrir en temps convenable les soupapes d'exhaustion et d'admission, afin de faire donner à la machine à vapeur un nouveau coup de piston. On conçoit dès lors que l'on peut régler à volonté l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux coups de piston successifs de la machine, en rétrécissant plus ou moins l'ouverture par laquelle l'eau sort du corps de pompe de la cataracte, ce qui produit une lenteur plus ou moins grande dans le mouvement ascendant du levier g.

Nous n'expliquerons pas en détail tout le mécanisme qui sert à ouvrir et fermer en temps utile les diverses soupapes de la machine, mais nous nous contenterons de faire connaître complétement ce qui se rapporte à la soupape d'exhaustion, ce qui suffira pour qu'on se rende compte de la manière dont la machine peut se suffire à elle-même, sans exiger, comme à l'origine, la présence d'un ouvrier spécialement chargé de manœuvrer les soupapes.

Une tige verticale s'appuie par son extrémité inférieure sur le levier g de la cataracte ; on ne ne la voit pas sur la figure 495, parce qu'elle est cachée par la poutrelle GG. Cette tige monte lentement en même temps que le levier g, et lorsqu'elle s'est élevée suffisamment, une saillie qui lui est fixée latéralement vient toucher la face inférieure du petit levier horizontal k. La tige continuant à monter, le levier k est soulevé. Une tringle l, supportant un contre-poids à sa partie inférieure, est articulée à un petit levier fixé à un axe horizontal m, et tend constamment à faire tourner cet axe, en abaissant le levier qui la supporte. Mais l'axe m porte une espèce de dent qui butte contre une autre dent fixée à la face inférieure du levier k, et qui s'oppose ainsi à ce que cet axe tourne sous l'action du contre-poids porté par la tringle l. Lorsque le levier k a été soulevé par la tige que la cataracte fait monter, la dent de l'axe m est rendue libre, et cet axe tourne en cédant à la force de traction qu'il éprouve de la part de la tringle l. Alors le manche n, fixé à l'axe m, se relève, et une tringle op articulée à un petit levier que porte également cet axe se

trouve brusquement tirée vers la droite ; un levier vertical pq, articulé en p avec la tringle op, et fixé à l'axe horizontal q, se trouve donc en même temps tiré vers la droite par son extrémité inférieure p ; l'axe q, en tournant sous l'action de ce levier, fait monter un autre levier r, qui lui est également fixé ; et ce dernier levier ouvre la soupape d'exhaustion, en soulevant sa tige s.

La soupape d'exhaustion étant ouverte, la tige verticale que soulève le levier g de la cataracte continue encore à monter, et vient bientôt soulever le levier horizontal t. Ce levier joue, par rapport à la soupape d'admission, le même rôle que le levier k par rapport à la soupape d'exhaustion ; aussitôt qu'il est un peu soulevé, la soupape d'admission s'ouvre par l'action d'un contre-poids qui fait lever en même temps le manche u. Alors le piston descend sous l'action de la vapeur, et la poutrelle GG descend avec lui : un long taquet x, fixé à la poutrelle, abaisse bientôt le manche u, et maintient ainsi la soupape d'admission fermée pendant le reste de la course du piston, pour que la vapeur n'agisse plus que par détente. Lorsque le piston arrive au bas de sa course, le taquet y de la poutrelle abaisse le manche n, de manière à fermer la soupape d'exhaustion. En même temps la poutrelle GG abaisse le levier g de la cataracte ; la tige verticale qui s'appuie sur ce levier s'abaisse aussi, et les leviers k, t, peuvent s'abaisser, pour s'opposer de nouveau à l'ouverture des soupapes d'admission et d'exhaustion, jusqu'à ce que la cataracte vienne soulever ces leviers. Au moment où le manche n est ramené dans la position qu'indique la figure, sous l'action du taquet y de la poutrelle, l'axe m en tournant décroche un contre-poids qui ouvre la soupape d'équilibre, et abaisse en même temps le manche v. Alors le piston remonte, la poutrelle GG remonte avec lui, et lorsqu'elle est sur le point d'arriver au haut de sa course, elle soulève le manche v, au moyen d'un taquet que l'on ne peut pas voir sur la figure. La soupape d'équilibre se trouve ainsi fermée, et la machine s'arrête complétement jusqu'à ce que la cataracte ouvre de nouveau les soupapes d'exhaustion et d'admission.

§ 422. Dans les machines du genre de celle dont nous nous occupons, on a adopté, pour les soupapes d'admission, d'équilibre et d'exhaustion, une forme particulière qu'il est bon de connaître, et qui est représentée par les figures 497 et 498. Une bonne soupape doit pouvoir s'ouvrir sans exiger un grand effort, et doit offrir un large passage à la vapeur sans avoir besoin de se déplacer beaucoup. Ces deux conditions sont très-bien remplies par

les soupapes des machines de Cornouailles. La vapeur doit passer de A en B, lorsque la soupape est ouverte; tandis que la communication de A avec B doit être interceptée, lorsque la soupape est fermée. On voit en C une pièce fixe, formée de six cloisons qui rayonnent autour d'un axe central, et terminée dans le haut par un disque circulaire, qui fait corps avec ces cloisons, et qui recouvre les espèces de compartiments compris entre elles. Cette pièce fixe C, qui forme le siége de la soupape, est à jour sur tout son contour, en sorte qu'elle laisse facilement passer la va-

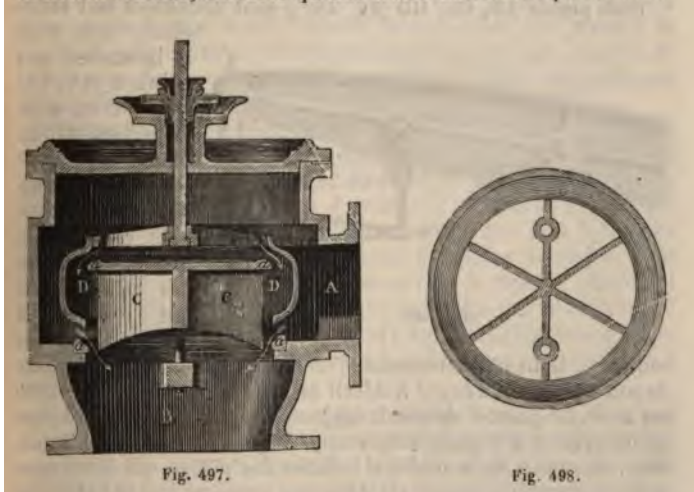


Fig. 497. Fig. 498.

peur de A en B. La soupape D est une sorte de fourreau qui enveloppe le siége C, et qui peut glisser le long des bords extérieurs de ces cloisons. Lorsqu'elle est abaissée autant que possible, elle s'appuie sur les parties coniques *a*, *a*, qui ne présentent que peu de largeur; lorsque, au contraire, elle est soulevée, comme le montre la figure, elle laisse passer la vapeur par les diverses ouvertures qui sont indiquées par des flèches. On voit que, par cette disposition, la soupape n'a pas besoin d'être soulevée d'une grande quantité pour livrer un large passage à la vapeur. D'un autre côté, la soupape étant percée à sa partie supérieure d'une ouverture circulaire presque aussi grande que celle qui existe à sa partie inférieure, la différence des forces élastiques de la vapeur, en A et en B, tend beaucoup moins à l'appuyer sur son siége que si elle était simplement formée d'un disque à bords conique

comme on l'avait supposé dans la figure théorique de la machine de Watt à simple effet (fig. 493, page 633).

On a établi depuis peu à Paris, à la *pompe à feu de Chaillot*, deux machines de Cornouailles, pour le service des eaux de la ville.

§ 423. **Parallélogramme articulé.** — On voit sur la figure 494 (page 638) un mode particulier de liaison de la tige B du piston avec l'extrémité C du balancier. Ce mode de liaison, dont l'invention est due à Watt, est désignée sous le nom de *parallélogramme articulé*. Voici en quoi il consiste :

Trois pièces AB, CD, BD (fig. 499), sont articulées soit entre elles, soit avec le balancier, aux points A et C. Ces trois pièces, avec la portion AC du balancier, constituent un parallélogramme qui peut changer de forme, par suite des articulations qui existent à chacun de ses sommets. Dans le mouvement d'oscillation du balancier autour de son axe O, l'extrémité A décrit un arc de cercle dont le centre est en O. Le point B décrirait également un arc de cercle ayant même centre, si le parallélogramme ABCD ne se déformait pas. Mais, en raison de la mobilité relative des pièces qui le composent, on conçoit qu'on peut le déformer à mesure que le balancier se déplace, de telle manière que le point B ne sorte pas d'une même droite verticale. Si l'on trouvait le moyen de rendre obligatoire cette déformation spéciale du parallélogramme, on pourrait attacher en B l'extrémité de la tige verticale d'un piston ; et cette tige, montant et descendant en même temps que le balancier oscillerait, conserverait constamment la même direction, sans que son extrémité fût portée, ni à droite ni à gauche, par suite de sa liaison avec le balancier. C'est ce à quoi Watt est parvenu d'une manière extrêmement simple. Il a observé que, si l'on oblige le point B à décrire une ligne droite verticale pendant toute une oscillation du balancier, le point D de son côté décrit une ligne courbe qui approche beaucoup d'être un arc de cercle ; il en a conclu que, si l'on obligeait le point D à décrire l'arc de cercle qui se confond presque complétement avec cette

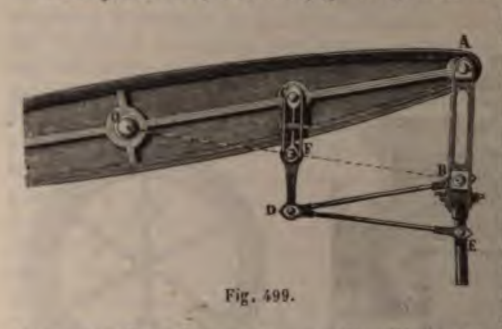


Fig. 499.

courbe, le point B ne sortirait pas sensiblement de la ligne droite qu'on lui faisait décrire précédemment. Or, pour obliger le point D à décrire un arc de cercle, il suffit évidemment de le relier au centre E de cet arc de cercle par une sorte de petit balancier DE. Par cette disposition, le sommet D du parallélogramme reste toujours à une même distance du point E, quelle que soit la position que prenne le balancier; le parallélogramme se déforme progressivement en conséquence de cette liaison du point D, et le point B décrit une ligne courbe qui se confond presque avec une ligne droite verticale. On peut donc attacher la tige du piston en B, et pendant tout le mouvement de va-et-vient que prendra le piston dans le cylindre, l'extrémité de sa tige ne sera écartée de la direction de l'axe du cylindre que de quantités insignifiantes de part et d'autre.

Habituellement les dimensions qu'on donne aux diverses pièces qui composent le parallélogramme articulé sont telles que le point E, centre du mouvement du point D, se trouve sur la direction de la ligne droite que doit décrire le point B; c'est ce qui fait que, sur la figure 499, le point E semble être lié à la tige du piston. Mais il n'en est rien; ce point E, autour duquel le petit balancier DE oscille, est situé en avant de la tige du piston, et reste complétement fixe, tandis que cette tige monte et descend derrière lui. On voit sur la figure 494 un parallélogramme où la position du point E est différente; ce point est notablement à gauche de la tige du piston.

Il existe, sur le côté CD du parallélogramme articulé, un point F qui jouit de la propriété de se mouvoir à très-peu près suivant une verticale, comme le point B. Ce point est situé à la rencontre du côté CD avec la ligne qui joindrait le point B au centre O du mouvement du balancier. On profite ordinairement de cette circonstance pour transmettre le mouvement au piston d'une pompe, dont on attache la tige au point F. L'étendue du mouvement de ce point F est évidemment plus petite que celle du point B.

§ 421. **Machine à vapeur de Watt à double effet.** — La machine à vapeur ne pouvait devenir un moteur universel, comme les roues hydrauliques, qu'autant qu'elle produirait le mouvement de rotation d'un arbre, mouvement qui peut être transmis à toute espèce de mécanisme, et qui peut, en conséquence, servir à effectuer toute espèce de travail. Mais, pour cela, il était important que l'action de la vapeur ne fût pas intermittente, comme dans la machine à simple effet; il fallait que le piston moteur fût constamment poussé par elle, quel que fût le sens dans lequel il marcherait à l'intérieur du cylindre. C'est

pour arriver à ce résultat que Watt a imaginé la machine à vapeur à double effet. Cette machine, que nous allons décrire, est le type des machines à vapeur de formes diverses qui font mouvoir maintenant une quantité innombrable d'ateliers, ainsi que des appareils moteurs des bateaux à vapeur, et des locomotives dont on se sert sur les chemins de fer.

La figure 500 représente l'ensemble de la machine de Watt; la figure 501 est une coupe, faite à une plus grande échelle, et des-

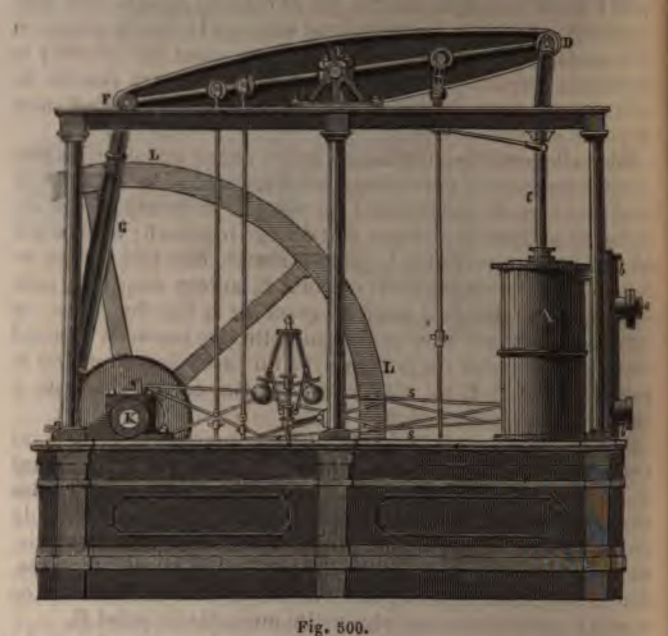


Fig. 500.

tinée à faire voir les parties intérieures. Le cylindre A est fermé à ses deux extrémités; c'est à son intérieur que le piston B se meut, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. La tige C du piston est reliée par un parallélogramme articulé à l'extrémité D du balancier DEF; et le mouvement de va-et-vient du piston détermine un mouvement d'oscillation du balancier autour de son axe E. De l'autre extrémité F du balancier part une bielle G, qui vient saisir en H le bouton d'une manivelle fixée à l'extrémité d'un arbre

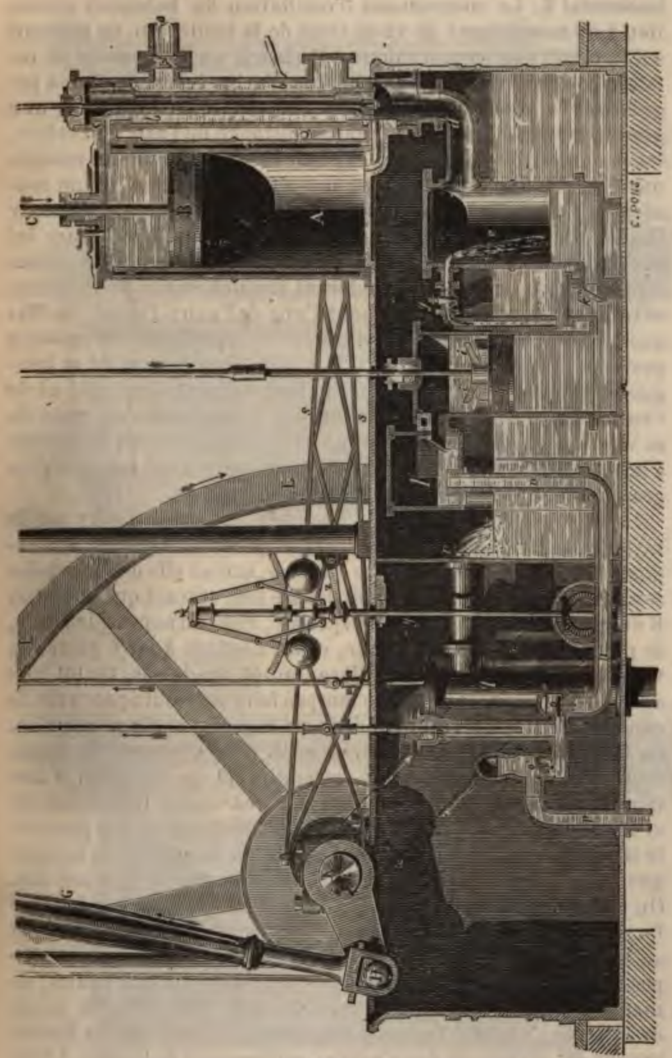


Fig. 501.

horizontal K. Le mouvement d'oscillation du balancier donne lieu à un mouvement de va-et-vient de la bielle, qui, en agissant sur la manivelle, communique à l'arbre K un mouvement de rotation continu. Un volant L, adapté à l'arbre K, est destiné à régulariser le mouvement de cet arbre, en répartissant sur une grande masse, située à une grande distance de l'axe de l'arbre, les irrégularités d'action qui existent toujours lorsqu'un mouvement de rotation est produit au moyen d'une bielle et d'une manivelle (§ 131). Ce volant permet d'ailleurs à l'arbre de dépasser facilement ce que l'on nomme les *points morts*, c'est-à-dire les positions pour lesquelles la bielle et la manivelle ont la même direction, soit qu'elles se recouvrent mutuellement, soit qu'elles se trouvent dans le prolongement l'une de l'autre. On voit en effet que lorsque l'arbre se trouve dans l'une ou dans l'autre de ces deux positions, la force appliquée à la bielle, dans le sens de sa longueur, ne tend à faire tourner la manivelle ni d'un côté ni de l'autre ; l'arbre ne peut donc continuer à tourner qu'en vertu de sa vitesse acquise, et cette continuation de mouvement se produit d'autant plus facilement que l'arbre entraîne avec lui une plus grande masse animée d'une plus grande vitesse.

La vapeur est amenée de la chaudière dans le cylindre par le tuyau *a* (fig. 501). Elle pénètre d'abord dans une capacité *b*, à laquelle on donne le nom de *boîte à vapeur*, et d'où elle doit se rendre soit dans le haut du cylindre, soit dans le bas, suivant que le piston B descend ou monte. Une pièce spéciale, que l'on nomme le *tiroir*, se meut dans la boîte à vapeur, et est destinée à faire passer la vapeur qui vient de la chaudière, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du piston, et en même temps à faire communiquer avec le condenseur la partie du cylindre vers laquelle le piston marche. La figure 502 représente le tiroir seul. C'est une sorte de tuyau creux, qui s'élargit à ses deux extrémités, et qui est muni d'une tige destinée à le faire mouvoir dans la boîte à vapeur. Les figures 503 et 504 représentent les deux positions différentes que doit prendre le tiroir, suivant que le piston descend ou monte ; elles ne sont que la reproduction plus en grand d'une partie de la figure 501. On voit que le tiroir s'appuie par les petites faces *c*, *c* sur les surfaces planes qui avoisinent les ouvertures aboutissant au haut et au bas du cylindre. Des garnitures d'étoupes sont d'ailleurs disposées sur le reste de son contour, vers ses deux extrémités, de manière qu'il s'adapte exactement de tous côtés avec les parois de la boîte à vapeur. Par cette disposition, on voit que la boîte à vapeur est divisée en deux parties entièrement distinctes. L'une de ces deux parties, formée de l'espace annulaire situé tout

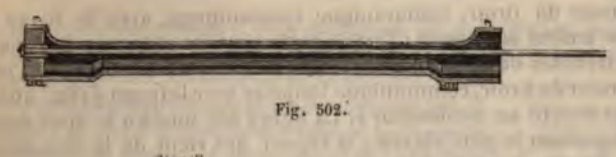


Fig. 502.

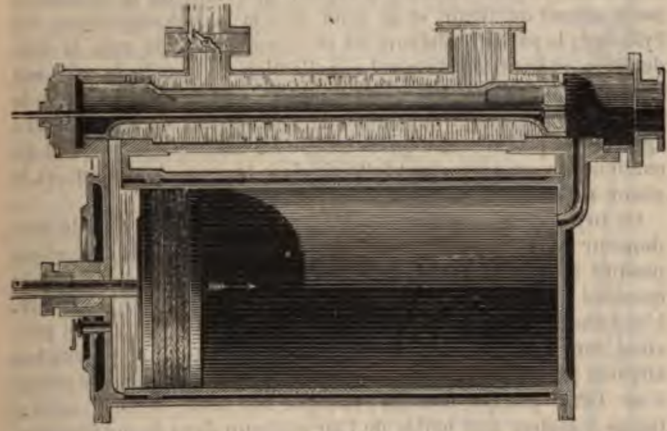


Fig. 503.

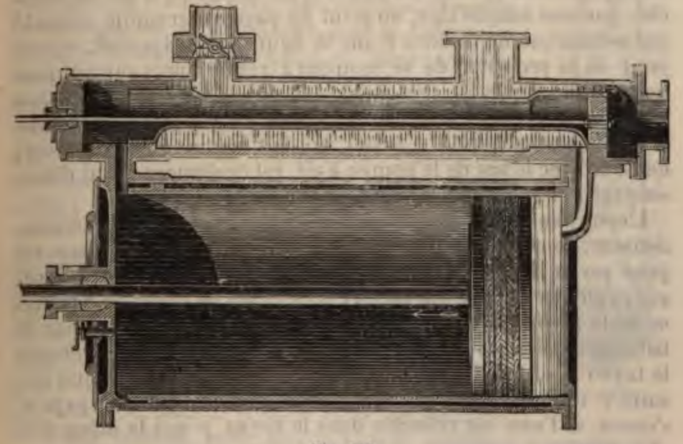


Fig. 504.

autour du tiroir, communique constamment avec le tuyau *a* qui amène la vapeur ; l'autre partie, qui se compose des deux extrémités de la boîte à vapeur réunies l'une à l'autre par l'intérieur du tiroir, communique toujours avec le tuyau *d* (fig. 501), qui aboutit au condenseur *e*. La figure 503 montre le tiroir dans sa position la plus élevée ; la vapeur qui vient de la chaudière passe autour du tiroir, et se rend dans la partie supérieure du cylindre ; la partie inférieure est en communication avec le condenseur, et le piston descend sous l'action de l'excès de pression qu'il éprouve sur sa surface supérieure. La figure 504 montre le tiroir dans sa position la plus basse ; la vapeur de la chaudière agit sous le piston ; celle qui se trouve au-dessus de lui se rend au condenseur, en traversant le tiroir dans toute sa longueur, et le piston monte.

Un tuyau *f* amène constamment un jet d'eau froide dans le condenseur *e*. Ce tuyau est muni d'un robinet *g*, à l'aide duquel on produit un étranglement plus ou moins grand, afin de régler la quantité d'eau qui s'introduit en *e*, pour y condenser la vapeur. L'eau chaude qui s'accumule au fond du condenseur, et qui provient, tant de la vapeur condensée, que de l'eau de condensation amenée par le tuyau *f*, en est constamment retirée par une *pompe à air*. Cette pompe, comme l'indique son nom, sert en même temps à aspirer une partie de l'air contenu dans le condenseur, ainsi que nous l'avons déjà expliqué à l'occasion de la machine de Cornouailles (§ 420). Le piston *h* de la pompe à air est attaché, par une longue tige, au point du parallélogramme articulé qui est marqué de la lettre F sur la figure 499 (page 646), et qui jouit de la propriété de se mouvoir à très-peu près suivant une ligne droite verticale, tout aussi bien que le point B. Ce piston *h* est percé de deux ouvertures garnies de soupapes *i* qui s'ouvrent de bas en haut. Le tuyau, qui fait communiquer le condenseur avec le bas de la pompe à air, est également muni d'une soupape *k*, qui s'ouvre du côté de la pompe.

L'eau chaude, que la pompe à air extrait constamment du condenseur, se rend dans une bâche *l*. Une portion de cette eau est prise par la *pompe alimentaire*, qui la refoule dans la chaudière, pour remplacer celle qui en sort sous forme de vapeur. Le piston *m* de la pompe alimentaire est aussi mis en mouvement par le balancier. Lorsqu'il s'élève, l'eau de la bâche *l* est aspirée par le tuyau *n*, et traverse la soupape *o* qui est ouverte ; lorsque ensuite il vient à s'abaisser, la soupape *o* se ferme, la soupape *o'* s'ouvre, et l'eau est refoulée dans le tuyau *p* qui la mène à la chaudière.

Une troisième pompe *q*, mue également par le balancier, puise de l'eau froide dans un puits, ou dans un cours d'eau voisin, et la verse par l'orifice *r* dans une bâche spéciale. C'est cette eau froide qui se rend au condenseur par le tuyau *f*, et qui y tombe sous forme de pluie, pour condenser la vapeur. L'écoulement de l'eau dans le tuyau *f* est produit principalement par l'excès de la pression atmosphérique, qui agit librement dans la bâche, sur la pression qui a lieu dans le condenseur.



Fig. 505.

Le mouvement alternatif que doit prendre le tiroir, pour permettre à la vapeur d'agir tantôt sur la face supérieure, tantôt sur la face inférieure du piston, lui est transmis par la machine elle-même. A cet effet l'arbre K porte une pièce P (fig. 505), dont le contour est circulaire, et dont le centre est placé en dehors de l'axe autour duquel tourne l'arbre K. Cette pièce est désignée sous le nom d'*excentrique*. Elle est enveloppée par un anneau Q, à l'intérieur duquel elle peut glisser en tournant. Pendant le mouvement de l'arbre K, la partie de l'excentrique P qui fait le plus saillie sur cet arbre, est reportée tantôt vers la droite, tantôt vers la gauche. L'anneau Q, lié aux tringles *s*, *s*, ne pouvant pas tourner avec l'excentrique, se trouve poussé par lui, soit d'un côté, soit de l'autre ; et il en résulte un mouvement de va-et-vient des tringles *s*, *s*. Ces tringles se réunissent à leurs extrémités opposées à l'anneau Q, et y présentent un cran à l'aide duquel elles saisissent le bouton *t* d'un levier coudé *tuv*. Par suite du mouvement de va-et-vient des tringles *s*, *s*, le levier *tuv* tourne autour de son point fixe *u*, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre ; et son mouvement alternatif se transmet à une tige verticale, qui est articulée d'une part, en *v*, au levier coudé, et d'une autre part à la tige du tiroir. On voit donc que la machine, une fois mise en mouvement, s'y maintiendra d'elle-même, puisque, au moyen de l'excentrique P convenablement installé, elle amène toujours le tiroir dans la position qu'il doit prendre à chaque instant, pour que la vapeur continue à exercer son action. *Pour mettre la machine en mouvement*, on soulève le

manche qui termine les tringles *s*, *s*, afin de rendre le levier *tuv* libre de se mouvoir sans elles ; puis, saisissant le manche qui termine le bras *ur*, on fait mouvoir le levier, de manière à donner au tiroir successivement les positions qu'il doit prendre, pour que la vapeur puisse agir alternativement sur les deux faces du piston. Aussitôt que la machine marche, on rétablit la communication des tringles *s*, *s* avec le levier *tuv*, et le mouvement continue de lui-même.

On voit sur la figure 501 une courroie sans fin *xx*, à l'aide de laquelle le mouvement de rotation de l'arbre K se transmet à un arbre vertical *y*. Cet arbre porte un régulateur à force centrifuge, appareil dont nous avons fait connaître précédemment le principe et le mode d'action (§ 134). Ce régulateur est disposé de manière à agir de lui-même sur la machine, pour diminuer ou augmenter la grandeur de la puissance, suivant que le mouvement devient trop rapide ou trop lent. A cet effet l'anneau qui forme le sommet inférieur du losange articulé du régulateur, présente sur son contour une rainure circulaire, analogue à une gorge de poulie. Un levier *z*, fixé par une de ses extrémités à un axe horizontal, se termine à l'autre extrémité par une fourchette dont les deux branches s'engagent dans la rainure dont nous venons de parler. Ce levier *z* ne gêne nullement le mouvement de rotation de l'anneau du régulateur, qui tourne librement entre les branches de la fourchette. Mais si le mouvement de rotation vient à s'accélérer, les boules s'écartent, l'anneau monte, et la fourchette du levier *z* est soulevée ; cette fourchette s'abaisse, au contraire, si le mouvement de la machine se ralentit. On voit donc que le levier *z* fera tourner l'axe horizontal auquel il est fixé, soit dans un sens, soit dans l'autre, suivant que la machine marchera plus vite ou plus lentement. Ce mouvement se transmet, par une série de tringles et de leviers, dont il est facile d'imaginer la disposition, jusqu'à l'axe d'une soupape à gorge installée dans le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière dans la boîte à vapeur, comme on le voit sur les figures 503 et 504. Il résulte de là que la soupape se dispose de manière à gêner de plus en plus le passage de la vapeur, à mesure que le mouvement de la machine devient plus rapide ; tandis que, s'il devient trop lent, elle livre à la vapeur un passage plus large qu'à l'ordinaire.

La machine à vapeur à double effet a reçu, depuis Watt, diverses modifications ayant pour objet, soit un meilleur mode d'action de la vapeur, soit plus de simplicité dans la construction, soit une disposition plus convenable sous le rapport de l'emplacement que la machine doit occuper, etc.

Nous n'entrerons pas dans le détail de toutes ces modifications, ce qui nous entraînerait beaucoup trop loin ; nous nous contenterons de faire connaître les plus importantes.

§ 425. **Pistons métalliques.** — Dans les premières machines à vapeur, on s'est servi de pistons pareils à ceux qu'on employait pour les pompes, c'est-à-dire de pistons munis d'une garniture d'étoupes sur leur contour. La flexibilité de cette garniture permettait au piston de s'appliquer exactement de toutes parts sur la surface intérieure du cylindre, malgré les imperfections que pouvait présenter cette surface. Mais on avait besoin d'y toucher souvent, afin de remédier à l'usure des étoupes qui était très-rapide. Les perfectionnements apportés au travail des métaux ont permis de supprimer complétement la garniture d'étoupes, et d'employer des pistons entièrement métalliques. On parvient en effet maintenant à raboter la surface intérieure d'un cylindre, ou, comme on dit, à *aléser* ce cylindre, de manière à faire disparaître toutes les inégalités qu'elle pouvait présenter ; en sorte qu'un piston à contour bien circulaire, qui s'adapterait exactement dans le cylindre en un des points de sa longueur, s'y adapterait également bien dans tous les autres points. Il est cependant nécessaire de laisser au contour du piston une certaine

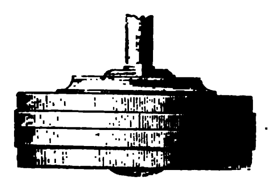


Fig. 506.

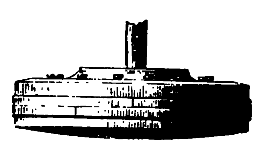


Fig. 507.



Fig. 508.



Fig. 509.

dant nécessaire de laisser au contour du piston une certaine flexibilité ; car, sans cela, il serait bien difficile d'établir un con-

tact exact entre lui et le cylindre, sans qu'il en résultât une trop grande adhérence, et même une sorte de grippement entre les surfaces. Aussi dispose-t-on les pistons comme on en voit ici deux exemples (fig. 506 à 509). Chacun des deux pistons est formé, pour ainsi dire, de deux assises de secteurs métalliques, placés à la suite les uns des autres, de manière à constituer comme deux anneaux superposés. Ces anneaux sont compris entre deux disques circulaires d'un diamètre un peu plus petit, sans cependant être assez serrés entre ces disques pour que les diverses pièces dont ils se composent ne puissent pas glisser en s'éloignant ou en se rapprochant de l'axe du piston. Des ressorts, placés à l'intérieur, tendent constamment à repousser au dehors les secteurs métalliques, qui viennent ainsi s'appliquer exactement sur la surface du cylindre, et qui peuvent cependant céder, en se rapprochant de l'axe, si quelque circonstance particulière les y oblige. Les ressorts du piston représenté par les figures 506 et 507 sont en assez grand nombre et en forme d'hélices; ceux de l'autre piston (fig. 508 et 509) sont de simples lames, fixées par leurs milieux, et agissant par leurs extrémités sur les secteurs métalliques.

§ 426. **Excentrique triangulaire.** — Nous avons vu que, pour que la vapeur pût arriver tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du piston, dans la machine à double effet, il fallait faire prendre au tiroir deux positions différentes. Pour que les choses se passassent exactement comme nous l'avons supposé, il faudrait que le tiroir restât immobile dans chacune de ces positions, tant que le sens du mouvement du piston resterait le même, et que ce tiroir passât rapidement d'une position à l'autre, aussitôt que le piston devrait changer le sens de son mouvement. L'excentrique que nous avons décrit dans la machine de Watt, et qui est destiné à faire mouvoir le tiroir, est loin de satisfaire à la condition qui vient d'être indiquée. Le tiroir en reçoit un mouvement continu, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre; il ne reste immobile dans aucune des positions qu'il prend successivement, et il ne passe pas brusquement d'une position à une autre. Aussi arrive-t-il que les ouvertures par lesquelles la vapeur doit passer de la boîte à vapeur dans le haut ou dans le bas du cylindre ne s'ouvrent et ne se ferment que progressivement; et il en résulte que ces ouvertures sont étranglées pendant une partie de la course du piston, ce qui occasionne une perte de travail. De même, la communication entre une des parties du cylindre et le condenseur ne s'établit que peu à peu; ce qui fait qu'au commencement, la vapeur qui doit se rendre au con-

lenseur éprouve une certaine difficulté à sortir du cylindre, et exerce en conséquence une pression résistante sur la face du piston avec laquelle elle est en contact.

Pour obvier à ces divers inconvénients de l'excentrique circulaire, on l'a remplacé par des pièces analogues, auxquelles on a conservé le nom d'excentrique. Nous citerons comme exemple l'excentrique triangulaire (fig. 510), qui est assez employé. Il se compose d'une pièce A, en forme de triangle à côtés courbes, qui est fixée à un arbre tournant B; cette pièce est engagée à l'intérieur d'un cadre rectangulaire que porte la tige CC, et agit alternativement sur les deux longs côtés de ce rectangle, de manière à donner un mouvement de va-et-vient à la tige CC, qui le communique au tiroir. D'après la forme de la pièce A, on voit que le tiroir passe plus rapidement d'une extrémité à l'autre de sa course que s'il était mû par un excentrique circulaire; et que, de plus, il reste immobile pendant quelque temps, dans chacune de ces positions extrêmes.

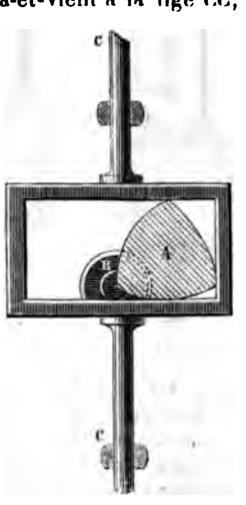


Fig. 510.

On peut faire disparaître en grande partie les inconvénients que nous avons signalés sans abandonner l'excentrique circulaire. Il suffit pour cela de donner peu de largeur aux ouvertures que le tiroir doit faire successivement communiquer avec la boîte à vapeur et avec le condenseur, et de rendre la course du tiroir notablement plus grande que cela ne serait strictement nécessaire pour donner lieu à ces changements de communication. De cette manière, les bords du tiroir n'emploient qu'une faible portion de la durée de sa course totale à passer sur chacune des ouvertures, qui ne se trouvent par conséquent étranglées que pendant un intervalle de temps de peu d'importance. Afin que les ouvertures dont il s'agit présentent un passage suffisant à la vapeur, on compense leur peu de largeur en les allongeant dans le sens perpendiculaire au mouvement du tiroir. C'est cette possibilité d'obtenir une distribution convenable de la vapeur, au moyen de l'excentrique circulaire, jointe aux avantages qu'il présente sous le rapport de la facilité de construction et de la solidité, qui fait

qu'il est encore employé dans le plus grand nombre de machines à vapeur.

§ 427. **Excentrique à détente.** — Le grand avantage que présente l'emploi de la vapeur avec détente (§ 419), sous le rapport de l'économie du combustible consommé, fait qu'on a cherché à disposer les machines à double effet de manière à y introduire ce mode d'action de la vapeur. Il suffit, pour y arriver, de donner au tiroir successivement diverses positions dans chacune desquelles il reste immobile pendant un certain temps, ainsi que nous allons le faire comprendre sans peine, au moyen des figures 511 à 514. Le

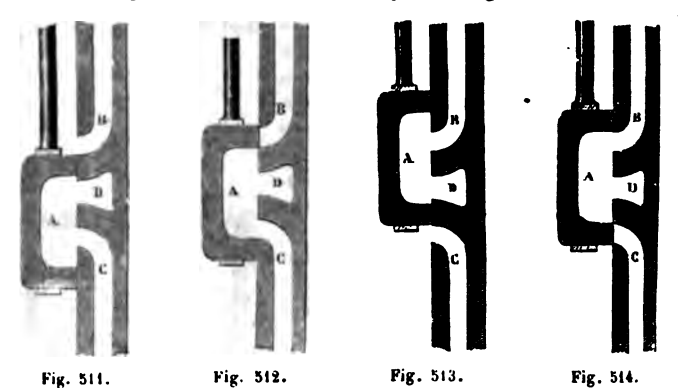


Fig. 511. Fig. 512. Fig. 513. Fig. 514.

tiroir A y est réduit à sa forme la plus simple, qui est généralement adoptée maintenant; il consiste en une pièce métallique concave, qui s'appuie par les bords de sa concavité sur la face plane où aboutissent les trois conduits B, C, D, et qui peut glisser sur cette face, de manière à y occuper les diverses positions indiquées. Ce tiroir se meut toujours à l'intérieur de l'espace fermé, nommé *boîte à vapeur*, dans lequel arrive la vapeur fournie par la chaudière. Les conduits B et C communiquent, l'un avec la partie supérieure du cylindre, l'autre avec la partie inférieure. Le conduit intermédiaire D aboutit au condenseur.

Dans la première position du tiroir (fig. 511), la vapeur qui vient de la chaudière passe librement par le conduit B, et agit à pleine pression sur la face supérieur du piston. Pendant ce temps, la partie inférieure du cylindre communique avec le condenseur par le conduit C et l'intérieur du tiroir. Le piston descend en vertu de la différence des pressions qu'il éprouve sur ses deux faces. Si le tiroir remonte, pour prendre la position indiquée par la figure 512,

lorsque le piston n'a encore fait qu'une partie de sa course descendante, la vapeur ne peut plus passer de la boîte à vapeur dans le conduit B ; et cependant le bas du cylindre communique toujours avec le condenseur. La vapeur qui se trouve dans le haut du cylindre agit donc en se détendant, et c'est sous cette action que le piston achève sa course descendante.

Si le tiroir remonte encore, pour prendre la position indiquée par la figure 513, au moment où le piston a atteint le bas du cylindre, la vapeur de la chaudière passe par le conduit C, et vient exercer sa pression sur la face inférieure du piston ; pendant ce temps, celle qui s'était introduite au-dessus de lui se rend dans le condenseur, par le conduit B et l'intérieur du tiroir. Si enfin le tiroir s'abaisse d'une certaine quantité, pour prendre la position indiquée par la figure 514, lorsque le piston n'a parcouru en montant qu'une partie de la hauteur du cylindre, la communication de la chaudière avec le bas du cylindre se trouve interceptée, sans que cependant le haut du cylindre cesse de communiquer avec le condenseur ; la vapeur qui s'est introduite jusque-là sous le piston continue donc à agir en se détendant, et le pousse ainsi jusqu'au haut du cylindre. Le tiroir revenant alors dans la position de la figure 511, le piston recommencera à descendre, et ainsi de suite.

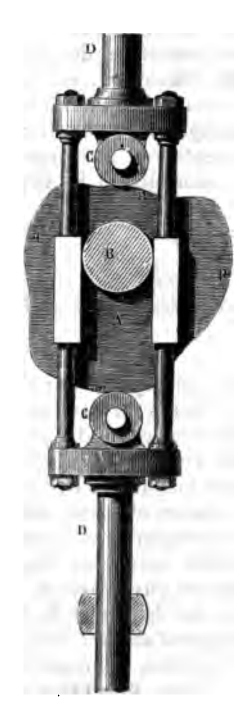


Fig. 515.

Pour faire prendre au tiroir successivement les quatre positions dont nous venons de parler, on se sert d'un excentrique d'une forme particulière que l'on nomme *excentrique à détente*. Il se compose essentiellement d'une pièce A (fig. 515), fixée à un arbre B, auquel la machine donne un mouvement de rotation. Le contour de cette pièce A est formé de quatre arcs de cercle *m*, *n*, *p*, *q*, concentriques à l'arbre B, et reliés l'un à l'autre par des parties courbes. Deux galets C, C, portés par une tige D, qui peut glisser dans le sens de sa longueur, *sont toujours en contact* avec les deux bords opposés de l'excen-

trique A. Lorsque l'arbre B tourne, de manière que l'excentrique touche le galet supérieur, successivement par les arcs *n*, *q*, *m*, *p*, la tige D prend quatre positions différentes. Or, il est aisé de voir que ces positions correspondent précisément à celles que nous avons indiquées pour le tiroir; en sorte qu'il suffit de faire conduire le tiroir par la tige D, pour que la vapeur agisse avec détente. La fraction de la course du piston, pendant laquelle la vapeur agit à pleine pression, dépend évidemment de la grandeur qu'on a donnée aux arcs *m*, *n*, qui sont destinés à maintenir le tiroir dans ses deux positions extrêmes.

§ 428. **Détente Clapeyron.** — On a imaginé bien des dispositions différentes, pour faire agir la vapeur avec détente dans les machines à double effet. Nous n'entrerons pas dans le détail de ces dispositions, qui sont plus ou moins compliquées; mais nous nous contenterons de faire connaître le moyen trouvé pour cela par M. Clapeyron, en employant un tiroir ordinaire mû par un excentrique circulaire. Ce moyen se recommande par sa grande simplicité, et convient surtout pour les machines où les mouvements sont très-rapides, comme les locomotives dont nous parlerons bientôt. Le tiroir A (fig. 516) se meut comme à l'ordinaire sur une surface plane où aboutissent les tuyaux B, C, communiquant avec les deux extrémités du cylindre, ainsi

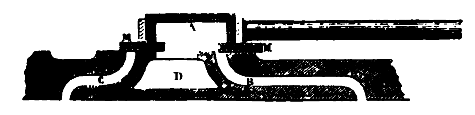


Fig. 516.

que le tuyau D par lequel la vapeur se rend au condenseur. Mais les bords du tiroir sont munis de deux pièces M, M, dont la largeur est beaucoup plus grande que celle des ouvertures B, C. Il résulte de cette seule modification apportée au tiroir, que lorsqu'une des ouvertures B, C cesse d'être en communication avec la boîte à vapeur, elle reste fermée pendant quelque temps, avant de communiquer avec le conduit D par l'intérieur du tiroir. On conçoit donc, que si l'on dispose l'excentrique de manière que chacune de ces ouvertures B, C soit fermée à un moment convenable par les bords élargis M, M du tiroir, il pourra arriver que la vapeur agisse d'abord à pleine pression, pendant une portion de la course du piston, et ensuite avec détente, pendant le reste de cette course.

§ 429. **Machine de Woolf à deux cylindres.** — Quelquefois on dispose, à côté l'un de l'autre, deux cylindres de même hauteur et de diamètres différents, dans lesquels la vapeur se rend successivement. Cette disposition, imaginée par Woolf, a encore pour

objet de faire agir la vapeur avec détente. Les deux pistons A, B (fig. 517) sont liés l'un à l'autre par les extrémités supérieures de leurs tiges ; en sorte qu'ils doivent se mouvoir ensemble, et être toujours à la même hauteur dans les cylindres C, D. Les robinets E, F permettent à la vapeur de la chaudière de pénétrer dans le

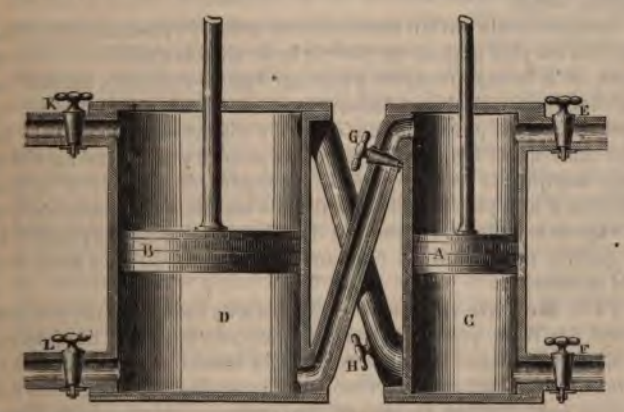


Fig. 517.

cylindre C, soit au-dessus, soit au-dessous du piston A ; les robinets G, H sont adaptés à des tuyaux à l'aide desquels on peut faire communiquer soit le haut du cylindre C avec le bas du cylindre D, soit le bas du cylindre C avec le haut du cylindre D ; enfin la vapeur peut sortir du second cylindre, pour se rendre au condenseur, par les robinets K, L. Les robinets E, H, L étant ouverts, et les autres fermés, la vapeur de la chaudière presse le piston A de haut en bas. La vapeur qui s'était introduite précédemment sous ce piston, et qui a déjà passé en partie dans le haut du cylindre D, presse le piston A de bas en haut, et le piston B de haut en bas ; mais cette seconde pression l'emporte sur la première, parce que le piston B est plus large que l'autre : la différence de ces deux pressions s'ajoute à la pression que le piston A éprouve sur sa face supérieure, pour former la force totale qui tend à abaisser l'ensemble des deux pistons. Les pistons descendent sous l'action de cette force totale. Lorsqu'ils sont au bas de leur course, les robinets E, H, L se ferment ; les autres s'ouvrent ; la vapeur de la chaudière se rend dans le bas du cylindre C ; celle qui était au *haut de ce cylindre* passe au bas du cylindre D, et celle

qui s'était rendue dans le haut du cylindre D s'échappe dans le condenseur. Les pistons remontent alors sous l'action d'une force égale à celle qui les avait fait descendre ; et ainsi de suite. Les divers robinets n'ont été mis ici que pour la facilité de l'explication ; en réalité on emploie des tiroirs, qui remplissent le même objet.

La force totale qui fait descendre ou monter l'ensemble des deux pistons est plus grande qu'elle ne le serait si le cylindre C existait seul, et si la vapeur, après avoir agi dans le cylindre, passait immédiatement dans le condenseur ; et cependant la quantité de vapeur dépensée pour chaque coup de piston serait la même. On voit donc que l'emploi d'un second cylindre occasionne un avantage marqué ; la même quantité de vapeur donne lieu à la production d'une plus grande quantité de travail. Cela tient à ce que la vapeur se détend en passant du cilyndre C dans le cylindre D, et qu'elle ne se rend au condenseur qu'après qu'on a ainsi utilisé sa détente.

§ 430. **Détente variable.** — Nous avons indiqué le moyen employé par Watt, pour faire varier l'action de la vapeur dans le cylindre, suivant que le mouvement de la machine s'accélère ou se ralentit, de manière à entretenir la vitesse de sa marche dans des limites convenables. Ce moyen, qui consiste dans l'emploi d'une soupape à gorge destinée à rétrécir plus ou moins le passage de la vapeur (§ 424), a l'inconvénient d'entraîner une perte de travail, par la manière même dont il agit (§ 318). Aussi a-t-on cherché à lui en substituer un autre plus avantageux. C'est ce à quoi on est parvenu, en disposant l'appareil qui sert à la distribution de la vapeur de manière que la détente puisse se produire à volonté à un degré plus ou moins grand ; c'est-à-dire que la vapeur puisse agir à pleine pression pendant une fraction plus ou moins grande de la course du piston, pour se détendre ensuite. On voit, en effet, que si, à chaque coup de piston, on laisse subsister pendant moins longtemps la communication de la chaudière avec le cylindre, on dépensera moins de vapeur, et le travail développé par l'action de la vapeur sur le piston sera diminué ; si, au contraire, on laisse agir la vapeur à pleine pression pendant une plus grande fraction de la course du piston, on dépensera plus de vapeur, et le travail appliqué à la machine sera plus grand. On comprend donc qu'on puisse, en faisant varier la détente, mettre constamment le travail moteur développé par l'action de la vapeur dans le cylindre en rapport avec la grandeur du travail résistant qui est appliqué à la machine, de manière à maintenir sa vitesse dans des limites convenables.

Nous n'entrerons pas dans la description des pièces qui permettent de faire varier la détente à volonté. Nous nous contenterons de dire que la variation de la détente est tantôt laissée à la volonté du mécanicien qui gouverne la machine, et tantôt produite par le régulateur à force centrifuge. Dans ce second cas, la machine se règle elle-même, et la détente varie suivant les besoins de la machine, sans que le mécanicien ait à s'en inquiéter.

§ 431. **Suppression du condenseur.** — L'emploi d'un condenseur n'est indispensable qu'autant que l'on ne donne pas à la vapeur, dans la chaudière, une force élastique de plus d'une atmosphère. Mais il n'en est plus de même lorsque la vapeur agit avec une force élastique notablement supérieure à celle de l'air atmosphérique. Il suffit, en effet, dans ce cas, de mettre alternativement chacune des extrémités du cylindre en communication avec l'atmosphère, pendant que l'autre extrémité communique avec la chaudière, pour que le piston soit mis en mouvement par la différence des pressions qu'il supporte sur ses deux faces. Ainsi l'emploi d'un condenseur est facultatif, pour les machines à haute pression. On le supprime, ou on le conserve, suivant les conditions dans lesquelles on est placé. Si l'on a facilement à sa disposition une grande quantité d'eau pouvant servir à la condensation de la vapeur, on opère cette condensation, parce qu'il en résulte un avantage sous le rapport du travail produit par une quantité donnée de vapeur ; le vide qui se forme dans la partie du cylindre vers laquelle le piston marche, occasionne une augmentation de travail moteur, qui n'est pas compensée par le travail résistant dû à la pompe à air et à la pompe à eau froide. Si, au contraire, on ne peut se procurer que difficilement l'eau nécessaire à la condensation, ou bien si l'objet que doit remplir la machine exige qu'elle n'occupe que peu de place, on supprime le condenseur, et par suite la pompe à air et la pompe à eau froide.

§ 432. **Avantage des machines à haute pression.** — Cherchons à nous rendre compte de l'avantage que peut présenter l'emploi de la vapeur à haute pression ; et pour cela supposons d'abord qu'on ne la fasse pas agir avec détente. Si l'on donne à la vapeur une force élastique de 4 atmosphères, sa température sera de 144°, d'après le tableau de la page 620 ; elle serait de 100°, si la force élastique était seulement de 1 atmosphère. En admettant qu'on puisse appliquer ici les lois de Mariotte et de Gay-Lussac (§§ 249 et 250), on verra qu'un volume 1 de vapeur saturée à la température de 144° occupera un volume 4, si on le dilate, sans *que sa température change*, jusqu'à ce que sa force élastique de-

vienne égale à 1 atmosphère, et que son volume se réduira ensuite à 3,58, si l'on abaisse sa température à 100°, sans que sa force élastique cesse d'être de 1 atmosphère. On peut donc dire que, si deux masses égales d'eau sont réduites en vapeur à saturation, l'une sous la pression de 4 atmosphères, l'autre sous la pression de 1 atmosphère, elles occuperont des volumes qui seront entre eux dans le rapport des nombres 1 et 3,58. Les cylindres de deux machines à vapeur, qui devront dépenser la même masse de vapeur pour chaque coup de piston, en fonctionnant, l'une à 4 atmosphères, l'autre à 1 atmosphère, devront donc avoir des capacités proportionnelles à ces mêmes nombres 1 et 3,58; c'est-à-dire que, si les pistons parcourent le même chemin dans les deux machines, leurs surfaces devront être entre elles dans le même rapport que ces nombres. Mais la pression supportée par chaque centimètre carré de la surface du premier piston est quatre fois plus grande que celle que supporte chaque centimètre carré de la surface du second; donc, en définitive, les pressions totales exercées par la vapeur sur les deux pistons seront entre elles comme les nombres 4 et 3,58. Les quantités de travail développées par la même masse d'eau réduite en vapeur, dans les deux machines, seront donc aussi entre elles comme ces nombres; c'est-à-dire qu'il y a un peu plus de travail produit par la vapeur qui agit à 4 atmosphères que par celle qui agit à 1 atmosphère. Mais aussi l'on voit, par le tableau de la page 621, qu'il faut plus de chaleur pour réduire une masse d'eau en vapeur saturée sous la pression de 4 atmosphères que sous la pression d'une seule atmosphère; en sorte que sous le point de vue économique, il serait à peu près indifférent de faire agir la vapeur à haute ou à basse pression.

D'après cela, les machines à haute pression, dans lesquelles la vapeur n'agit pas avec détente, ne présentent d'avantage réel qu'en ce que la pression résistante, provenant de la vapeur qui s'échappe du cylindre pour se rendre, soit au condenseur, soit dans l'atmosphère, est d'autant plus faible que la surface du piston est plus petite; et aussi en ce que le cylindre occupe moins de place qu'il ne devrait en occuper, si la vapeur était employée à basse pression.

Mais dans le cas où l'on utilise la détente de la vapeur, et c'est ce qu'on cherche toujours à faire maintenant, les machines à haute pression présentent un avantage très-marqué, qui consiste en ce que la détente peut être produite dans une étendue beaucoup plus grande que dans les machines à basse pression.

Dans la plupart des machines à vapeur que l'on construit actuellement, la vapeur est employée avec une force élastique de 4, 5 et même 6 atmosphères ; on dépasse rarement cette limite.



Fig. 518.

§ 433. **Transmission du mouvement du piston à un arbre tournant.** — Dans la machine de Watt, le mouvement de va-et-vient du piston se transmet à un arbre tournant, par l'intermédiaire d'un balancier, d'une bielle et d'une manivelle. Souvent on supprime le balancier, et l'on réunit directement l'extrémité de la tige du piston à la bielle (fig. 518). Dans ce cas, la tige A a besoin d'être guidée dans son mouvement, pour qu'elle ne soit pas faussée par la résistance oblique qu'elle éprouve de la part de la bielle, résistance qui change de direction et de sens à mesure que la manivelle tourne autour de l'arbre. A cet effet, l'extrémité B de la tige est munie de pièces spéciales, nommées *glissières*, placées de chaque côté de cette extrémité, et assujetties à glisser entre des guides fixes E, E.

M. Cavé a encore simplifié la transmission du mouvement du piston à l'arbre tournant, en supprimant la bielle, et articulant directement la tige du piston à la manivelle. Mais, pour cela, il a fallu rendre le cylindre A mobile (fig. 519), afin que la tige B du piston pût être toujours dirigée suivant son axe, dans toutes les positions qu'elle prend, d'après sa liaison avec la manivelle CD. Aussi le cylindre



Fig. 519.

est-il supporté par deux tourillons E, autour desquels il tourne en oscillant, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre : c'est ce qui a fait donner aux machines de ce genre le nom de *machines à cylindre oscillant*. Pour que le piston puisse toujours donner au cylindre la position convenable, on munit sa tige de deux galets F,F, qui s'appuient sur deux tringles fixées sur le fond du cylindre. Les tourillons E étant les seules parties du cylindre qui conservent la même position pendant le mouvement de la machine, c'est par l'intérieur de l'un d'eux que passe la vapeur qui vient de la chaudière, et par l'intérieur de l'autre que sort celle qui a cessé d'agir. L'appareil qui sert à la distribution de la vapeur est porté par le cylindre, et oscille avec lui.

§ 434. **Chaudières à vapeur.** — La production de la vapeur nécessaire à la marche des machines à vapeur s'effectue dans des

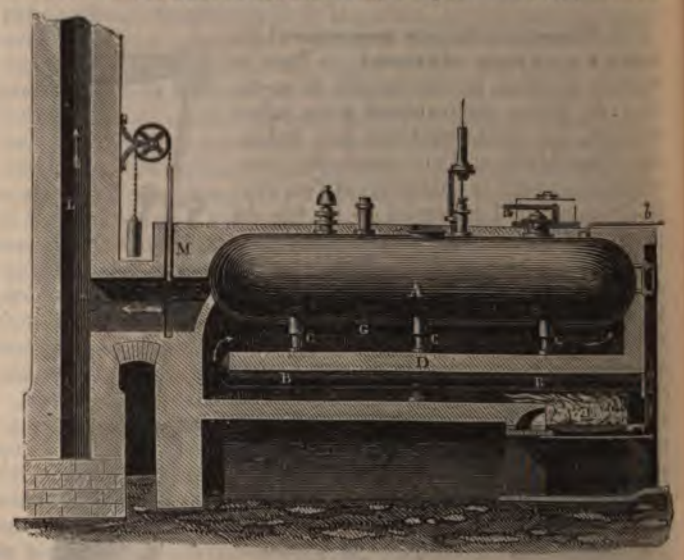


Fig. 520.

chaudières auxquelles on donne des formes diverses. On voit, par ce que nous avons dit relativement à l'invention des machines à vapeur (§§ 412 à 416), que les premières chaudières employées étaient sphériques, ou au moins formées d'une portion de sphère avec un fond plat. Cette forme, qui a dû naturellement se présenter tout d'abord, a le grave défaut de n'offrir qu'une faible sur-

face, pour une masse d'eau considérable, ce qui est peu favorable à la production de la vapeur. Aussi Watt a-t-il donné une disposition toute différente à ses chaudières. Il a adopté pour cela la forme d'un cylindre allongé dans le sens horizontal, et ayant pour section perpendiculaire à ses arêtes une courbe à parties rentrantes. Les chaudières de Watt pouvaient ainsi recevoir l'action directe de la flamme du foyer sur une surface beaucoup plus grande que les chaudières précédentes, à égalité de capacité intérieure.

La forme d'un cylindre allongé est celle qu'on adopte encore maintenant dans la construction des chaudières à vapeur. Mais on a dû modifier la section transversale du cylindre, en raison de la grandeur de la force élastique avec laquelle on fait ordinairement agir la vapeur. On conçoit, en effet, que si la chaudière présente des parties rentrantes, et que la pression exercée par la vapeur à son intérieur soit notablement supérieure à la pression atmosphérique, cet excès de pression tend à déformer la chaudière, en repoussant au dehors les parties rentrantes; les faces planes elles-mêmes, s'il y en a, doivent être rendues convexes, par l'effet de cet excès de pression. Aussi, pour que les chaudières ne se déforment pas, et qu'elles résistent également bien partout à la pression intérieure, on leur donne la forme d'un cylindre allongé à base circulaire, et on les termine à leurs extrémités par des calottes sphériques, souvent même par des hémisphères. C'est ce que l'on voit sur les figures 520 et 521, dont la première est une coupe longitudinale du fourneau destinée à faire voir la chaudière dans le sens de sa longueur, et la seconde en est une coupe transversale. Au-dessous du corps A de la chaudière, on voit deux cylindres B, B, qui ont à peu près la même longueur qu'elle, et dont le diamètre est plus petit. Ces cylindres, auxquels on donne le nom de *bouilleurs*, communiquent avec la chaudière A au moyen des tubulures C, C, et sont destinés à augmenter la surface de chauffe.

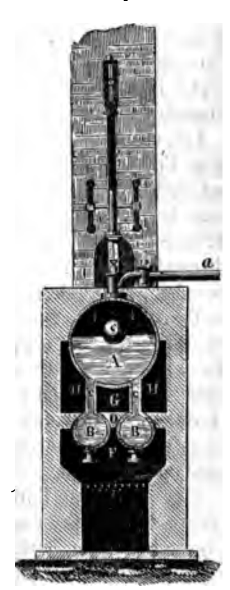


Fig. 521.

Le fourneau est construit de manière à obliger la flamme à

venir toucher successivement les diverses parties de la surface de la chaudière. A cet effet, une cloison horizontale D règne dans toute sa longueur, à la hauteur des bouilleurs; et deux cloisons verticales, passant par les tubulures C, C, divisent en trois compartiments l'espace qui reste libre entre cette cloison horizontale et la partie inférieure du corps de la chaudière. La flamme, en sortant du foyer E, se rend d'abord dans le conduit F, qui la ramène à l'extrémité postérieure de la chaudière : de là elle passe dans le compartiment G, et revient vers la partie antérieure; enfin, arrivée à l'extrémité du conduit G, elle se divise en deux, et retourne à la partie postérieure de la chaudière en passant par les conduits latéraux H, H, auxquels on donne le nom de *carneaux*. A sa sortie des carneaux H, H, elle se rend dans la cheminée L. Un registre M, dont le poids est équilibré par un contre-poids, sert à fermer plus ou moins le conduit qui relie les carneaux à la cheminée, afin de régler le tirage.

Les chaudières à bouilleurs, construites en tôle, sont celles que l'on emploie le plus en France, mais elles sont loin d'être les seules employées. Ainsi on trouve souvent des chaudières sans bouilleurs; ou bien des chaudières avec un tuyau cylindrique qui les traverse dans toute leur longueur, et au milieu duquel est installé le foyer; ou bien encore des chaudières traversées par plusieurs petits tuyaux parallèles, dans lesquels passe la flamme, etc. Dans tous les cas, quel que soit le système de la chaudière qu'on emploie, il faut faire en sorte que la surface de chauffe ait une étendue proportionnée à la quantité de vapeur qui doit être produite dans un temps déterminé. L'expérience a fait voir que cette surface doit être d'au moins 1 mètre carré par force de cheval de la machine; et que même il serait convenable de la porter à $1^{mq},3$.

Un tuyau, que l'on voit en *a* (fig. 521), part de la paroi supérieure de la chaudière, et sert à conduire la vapeur à la machine. Un second tuyau *b* (fig. 520) sert à l'alimentation de la chaudière, c'est-à-dire à l'introduction de l'eau destinée à remplacer celle qui s'en va sous forme de vapeur; ce tuyau plonge dans la chaudière, et vient déboucher au milieu de l'eau qu'elle contient.

§ 435. Depuis que la vapeur est employée comme moteur, on a eu à déplorer un grand nombre de malheurs, résultant de l'explosion des chaudières à vapeur. Aussi s'est-on préoccupé de trouver les moyens convenables pour prévenir le retour de semblables malheurs. Avant de faire connaître ceux de ces moyens auxquels on s'est arrêté, nous indiquerons d'abord les principales causes des explosions des chaudières.

Une première cause d'explosion, celle que l'on avait regardée tout d'abord comme en étant la cause unique, consiste dans le défaut de solidité de la chaudière. Si l'on augmente progressivement la tension de la vapeur à l'intérieur d'une chaudière, on conçoit qu'il arrivera un moment où les parois ne seront plus capables de résister à sa force expansive, et elles se déchireront pour lui livrer passage au dehors. Supposons donc qu'une chaudière soit assez peu solide pour que cette limite de résistance, qu'elle ne peut pas dépasser, corresponde à une tension que la vapeur puisse prendre pendant la marche de la machine : il en résultera nécessairement une explosion.

Mais il est très-rare que les choses se passent ainsi. Le plus habituellement les explosions sont dues à ce que certaines parties des parois de la chaudière se trouvent portées accidentellement à une température très-élevée, et sont mises ensuite rapidement en contact avec une certaine quantité d'eau. On conçoit, en effet, que ces circonstances peuvent occasionner une explosion, par deux causes différentes. En premier lieu, l'eau qui vient à toucher les parois rougies par l'action du feu doit se vaporiser rapidement, ce qui détermine une augmentation brusque de la pression à l'intérieur de la chaudière. En second lieu, le refroidissement presque instantané, qu'éprouvent ces parois rougies de la chaudière, amène une modification dans leur constitution moléculaire, et facilite beaucoup leur déchirure sous l'action de la pression intérieure.

Tant que la portion des parois d'une chaudière qui est en contact avec la flamme au dehors reste baignée par l'eau au dedans, il n'y a pas à craindre que les effets dont nous venons de parler se produisent. Mais il n'en sera plus de même si le niveau de l'eau baisse, à l'intérieur, au-dessous des points les plus élevés des carneaux dans lesquels la flamme circule. On voit que, dans ce cas, les parties de la paroi de la chaudière qui sont situées entre le niveau de l'eau et le haut des carneaux peuvent être facilement rougies ; et si l'eau se trouve projetée sur ces parois rouges, par suite du bouillonnement qui accompagne l'ébullition, il pourra en résulter une explosion.

L'eau employée à l'alimentation d'une chaudière y dépose souvent des matières solides, qui forment un encroûtement de plus en plus épais. Les parois inférieures de la chaudière, n'étant plus en contact direct avec l'eau, peuvent prendre une température beaucoup plus élevée que si ce dépôt n'existait pas. Si ensuite, par une cause quelconque, il vient à se produire quelque fissure dans cet encroûtement, l'eau s'y infiltre, se trans-

forme en vapeur au contact de parties plus chaudes, et, soulevant ainsi le dépôt, met à nu une étendue plus ou moins grande de la paroi qu'il recouvrait. Souvent des explosions se sont produites dans ces circonstances.

Les explosions des chaudières à vapeur sont habituellement accompagnées d'effets mécaniques extraordinaires, tels que la projection de pièces d'un grand poids à une distance énorme. On aurait peine à se rendre compte de ces effets, si l'on cherchait à les expliquer par l'action de la vapeur qui existait dans la chaudière au moment de l'explosion, lors même qu'on attribuerait à cette vapeur une tension considérable. Mais il faut observer que la masse d'eau contenue dans la chaudière, étant brusquement mise en communication avec l'atmosphère, et ayant une température très-notablement supérieure à 100°, doit se vaporiser en grande partie, et donner lieu presque instantanément à la production d'une quantité de vapeur extrêmement grande. C'est cette vapeur, formée au moment même de l'explosion, qui occasionne les effets extraordinaires que l'on observe.

§ 436. Voyons maintenant quelles sont les mesures que l'on a adoptées pour s'opposer à ce que les circonstances que nous venons de signaler puissent se présenter.

Pour qu'une chaudière à vapeur puisse être employée en France, il faut qu'elle porte un timbre qui indique le nombre d'atmosphères que la tension de la vapeur à son intérieur ne doit pas dépasser. Ce timbre est poinçonné par l'administration, après qu'on a fait subir à la chaudière une épreuve, qui consiste à la remplir d'eau, et à exercer sur cette eau, au moyen d'une pompe foulante, une pression triple de celle que le timbre indique.

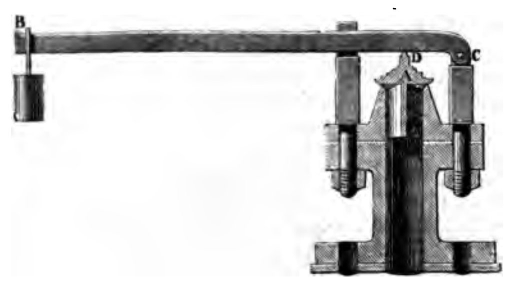


Fig. 522.

Pour que la tension de la vapeur, dans la chaudière, ne puisse *pas dépasser* la limite pour laquelle la chaudière a été éprouvée,

on lui adapte deux soupapes de sûreté, une à chacune de ses extrémités. La figure 522 en montre la disposition. La soupape A est placée à l'extrémité d'un tuyau vertical qui communique inférieurement avec la chaudière. Un levier BC, mobile autour du point C, s'appuie en D sur la tête de la soupape. Un poids est suspendu à l'extrémité B de ce levier; il y a été placé de manière à exercer sur la soupape A une pression égale à celle qu'elle éprouverait de bas en haut de la part de la vapeur, si sa force élastique atteignait la valeur qu'elle ne doit pas dépasser. La figure 523 montre la soupape seule, et la figure 524 en est une coupe horizontale, destinée à faire comprendre la disposition de la partie qui pénètre dans le tuyau qu'elle doit fermer. Cette partie inférieure de la soupape est formée de trois ailettes, qui doivent la guider dans son mouvement, lorsqu'elle est soulevée par un excès de tension intérieure, et qui sont disposées de manière à s'opposer aussi peu que possible à la sortie de la vapeur.

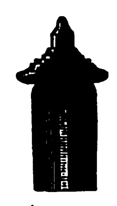

Fig. 523.


Fig. 524.

§ 437. Il est important que le chauffeur puisse connaître à chaque instant la force élastique de la vapeur, afin qu'il active le feu plus ou moins, de manière à maintenir cette force élastique dans des limites convenables. A cet effet on adapte à la chaudière un manomètre, qui communique constamment avec son intérieur. On se sert souvent pour cela d'un manomètre à air comprimé (fig. 525), dont nous avons précédemment indiqué le principe (§ 258). La vapeur arrive en *a*, et vient exercer sa pression sur le mercure contenu dans un vase *b*, où plonge un tube de verre *c*, contenant de l'air, et fermé par le haut. L'extrémité supérieure de la colonne de mercure, dans ce tube de verre, indique la force élastique de la vapeur en atmosphères, d'après la position qu'elle occupe sur la graduation qui accompagne ce tube.



Fig. 525.

Toutes les fois que la tension de la vapeur ne doit pas dépasser 4 atmosphères, le manomètre à air comprimé doit être remplacé par un manomètre à air libre (§ 257). Ce manomètre, dont les indications sont plus certaines que celles du précédent, présente un inconvénient assez grave : la grande longueur de tube que l'extrémité de la colonne de mercure doit parcourir,

suivant que la pression est de 2, 3, 4 atmosphères, fait que cette extrémité est souvent mal placée pour qu'on puisse la voir facilement. Pour obvier à cet inconvénient, on adopte quelquefois la disposition de la figure 526. La vapeur, qui arrive en *a*, exerce sa pression sur le mercure du vase *b*, et le fait monter dans le tube *cc*, qui est ouvert par le haut; un flotteur *d* s'appuie constamment sur le sommet de la colonne de mercure, et est suspendu à un fil, qui passe sur une poulie, et qui supporte un contre-poids *e* à son autre extrémité. Les mouvements de la colonne de mercure sont indiqués par ce contre-poids qui se meut en sens contraire, et que l'on aperçoit très-facilement.

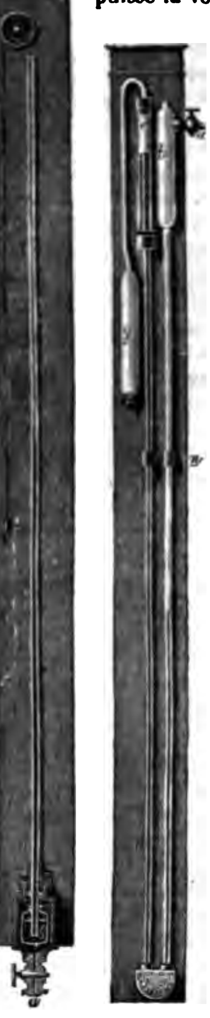


Fig. 526. Fig. 527.

La figure 527 montre une autre disposition du manomètre à air libre, dans laquelle l'extrémité supérieure de la colonne de mercure se meut dans une étendue beaucoup moins grande. La vapeur de la chaudière arrive en *a*, et communique librement avec l'intérieur d'une capacité *b*. Du bas de cette capacité part un tube métallique *cc*, qui descend d'abord, se recourbe ensuite pour remonter suivant *dd*, et vient aboutir à un tube de verre *e*, qui est beaucoup plus large. Du haut de ce tube de verre part un tube *f* qui vient pénétrer dans un vase *g*, sans toucher les bords de l'ouverture par laquelle il entre à son intérieur. Le mercure se trouve dans le tube recourbé *cd*, il descend en *c* sous l'action de la vapeur, et monte en même temps en *d*, jusque dans le tube de verre *e*, où il éprouve la pression de l'air atmosphérique qui pénètre librement par le tube *f*. C'est la différence de niveau du liquide dans ces deux branches qui sert de mesure à l'excès de la pression de la vapeur sur

celle de l'atmosphère. Or, à cause de la différence de diamètre des tubes *c*, *e*, une grande dépression dans le premier n'entraîne qu'une faible élévation dans le second; il en résulte que le chemin parcouru par la surface du mercure en *e* est très-petit, lorsque la pression de la vapeur varie beaucoup. Le vase *g*, dans lequel débouche le tube *f*, est destiné à recueillir le mercure, dans le cas où un excès de pression dans la chaudière le ferait sortir du tube recourbé *cd*.

Il y a quelques années, M. Bourdon a imaginé un manomètre métallique, qui remplace avec avantage les manomètres à mercure. La pièce principale de ce manomètre consiste en un tuyau courbe de cuivre B (fig. 528), à l'intérieur duquel on fait agir la pression de la vapeur. L'une des extrémités de ce tuyau est fixée au point où aboutit le tuyau A, par lequel arrive la vapeur qui vient de la chaudière; et d'ailleurs il n'est attaché à la boîte qui le contient par aucun autre point. Son extrémité C est fermée. Sa section transversale n'est pas un cercle, mais une courbe très-aplatie, comme le montre la figure 529, qui en donne les dimensions en vraie grandeur. Lorsque la vapeur de la chaudière communique avec l'intérieur du tuyau B, la pression qu'elle exerce contre ses parois le gonfle un peu en diminuant l'aplatissement de sa section transversale; ce léger gonflement entraîne un changement dans la courbure du tuyau, qui tend à se redresser de plus en plus, à mesure que la pression intérieure augmente. Il en résulte que l'extrémité C se déplace, et fait mouvoir une aiguille DEF, à laquelle elle est liée par la tige CD. Cette aiguille, mobile autour du point E, aboutit par son extrémité F à divers points d'un arc divisé, dont la graduation a été faite de manière à indiquer la pression en atmosphères, d'après la position de l'aiguille. Le manomètre métallique de M. Bourdon est beaucoup plus commode que les précédents, dont les tubes de verre se brisent facilement, et occasionnent la perte du mercure; mais on a besoin



Fig. 528.

Fig. 529.

de s'assurer de temps en temps si les indications qu'il fournit ne cessent pas d'être exactes, par suite des modifications lentes qui pourraient survenir dans l'état moléculaire du tuyau courbe, sous l'action prolongée de la pression qui s'exerce à son intérieur.

§ 438. D'après ce que nous avons dit sur les causes d'explosion des chaudières (§ 435), on doit surtout éviter que certaines parties des parois ne se trouvent en contact avec la flamme au dehors, sans être mouillées par l'eau en dedans, soit en raison des encroûtements qui résultent des matières solides déposées par l'eau, soit par suite d'un trop grand abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière.

On se met à l'abri de la première de ces deux causes d'accidents, en nettoyant souvent l'intérieur de la chaudière. On emploie aussi quelquefois un moyen particulier, qui consiste à introduire dans la chaudière des substances diverses, suivant la nature du dépôt formé par les eaux, afin que ce dépôt ne se durcisse pas, et reste à l'état pulvérulent.

Quant à la position du niveau de l'eau dans la chaudière, elle doit être l'objet d'une surveillance continuelle de la part du chauffeur; et c'est pour cela qu'on met à sa disposition des appareils destinés à la lui indiquer à chaque instant. Parmi ces appareils, nous citerons d'abord le flotteur *c* (fig. 521, page 667) qui monte et descend en même temps que le niveau de l'eau, et dont le mouvement est rendu sensible au dehors, par une tige déliée qui le surmonte verticalement et qui traverse la paroi de la chaudière. On emploie aussi deux robinets, qui sont adaptés à la chaudière en des points peu éloignés de la position que doit avoir constamment le niveau de l'eau, et situés l'un au-dessus, l'autre au-dessous de ce niveau; en ouvrant successivement ces deux robinets, on doit voir sortir de l'eau par le plus bas des deux, et de la vapeur par l'autre. Un troisième moyen, qui est excellent pour constater la position du niveau de l'eau dans la chaudière, consiste à adapter à sa partie antérieure un tube de verre *d* (fig. 520, page 666), qui communique par ses deux extrémités avec l'intérieur, et qui est placé de manière que le niveau de l'eau doive toujours correspondre à peu près au milieu de sa longueur; l'eau se rend librement dans ce tube par le bas, et y prend le même niveau que dans la chaudière, ce qui permet de voir à chaque instant la position qu'occupe ce niveau.

Les moyens que nous venons d'énumérer ne peuvent servir à prévenir un abaissement de niveau dans la chaudière, qu'autant que le chauffeur y fait attention; ils sont souvent inefficaces, en

raison de la négligence de cet ouvrier. Aussi a-t-on imaginé un appareil qui a pour objet d'appeler son attention, dans le cas où le niveau de l'eau éprouverait un trop grand abaissement. Cet appareil, nommé *flotteur d'alarme*, est représenté par la figure 530. Il consiste en un flotteur A fixé à l'extrémité d'un levier ABC qui porte un contre-poids C à son autre extrémité. Tant que le niveau est assez élevé dans la chaudière, le flotteur A est poussé de bas en haut par le liquide; la pièce conique *a*, portée par le levier, se

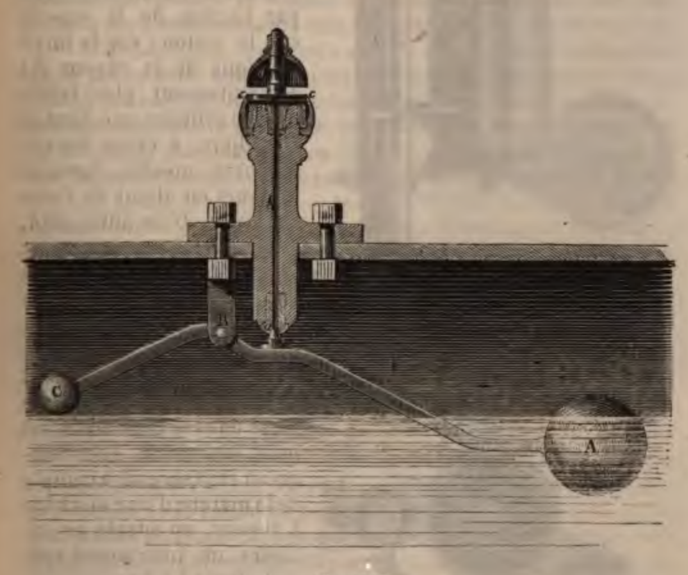


Fig. 530.

trouve ainsi appuyée contre l'orifice du tuyau vertical *b*, et ferme complétement cet orifice. Mais si le niveau vient à baisser plus qu'il ne doit le faire, le flotteur A s'abaisse avec lui, le bouchon conique *a* ne ferme plus le tuyau *b*, et la vapeur passe dans ce tuyau, pour s'échapper par l'ouverture annulaire *cc*. Le jet de vapeur, qui sort ainsi sous forme de lame circulaire, vient rencontrer le timbre *d* par sa tranche, sur tout son contour: le timbre se met en vibration, et il en résulte un sifflement aigu que tout le monde connaît, pour l'avoir entendu près des locomotives

des chemins de fer, dont le sifflet est disposé de la même manière.

§ 439. **Indicateur de Watt.** — La connaissance de la force élastique de la vapeur dans la chaudière, qui est fournie par les indications du manomètre, ne suffit pas pour qu'on puisse évaluer le travail développé par l'action de la vapeur sur le piston; car la force élastique de la vapeur est ordinairement plus faible dans le cylindre que dans la chaudière, à cause des résistances qu'elle éprouve toujours en allant de l'une à l'autre. D'un autre côté, lorsqu'on fait agir la vapeur avec détente, il n'y a plus de communication entre le cylindre et la chaudière, et par conséquent le manomètre ne peut nullement faire connaître ce qui se passe dans le cylindre. C'est pour ces motifs que, lorsqu'on veut se rendre compte de la marche d'une machine à vapeur, on adapte au cylindre un instrument spécial destiné à faire connaître la tension de la vapeur à chaque instant. Cet instrument, dû à Watt, est désigné sous le nom d'*indicateur de Watt*.



Fig. 531.

Fig. 532.

Il se compose d'un petit cylindre A (fig. 531 et 532), dans lequel se trouve un piston, dont la tige B fait saillie à son extrémité. Ce cylindre est garni d'un filet de vis à sa partie inférieure, de manière à pouvoir se fixer dans une ouverture taraudée que l'on pratique dans l'un des fonds du cylindre de la machine à vapeur. Lorsque l'appareil est ainsi installé, la vapeur qui agit

dans la machine communique avec l'intérieur du cylindre A, et exerce une pression plus ou moins grande sur le petit piston qu'il contient : ce piston cède à l'action de cette pression, et le ressort en hélice C, qui entoure sa tige, se comprime d'autant plus que la force élastique de la vapeur est plus grande. Un index, que porte la tige du petit piston, vient ainsi correspondre à un des points d'une échelle graduée que porte le cylindre A, et peut faire connaître la tension de la vapeur.

Mais la rapidité du mouvement de la machine, jointe à la variation qu'éprouve la tension de la vapeur pendant une seule course du piston moteur, fait que l'indicateur serait d'un emploi difficile, s'il se réduisait à ce que nous venons de dire. Pour qu'il puisse être employé plus facilement, et fournir en même temps des indications plus précises, on a adapté à la tige B du petit piston un porte-crayon D, qui est destiné à imprimer sa trace sur une bande de papier enroulée autour du cylindre E. Cette bande est tendue sur la surface du cylindre, et ses deux extrémités y sont maintenues par les deux lames de ressort *d*, sous lesquelles elles se trouvent engagées. Pendant que le piston de la machine à vapeur marche, le cylindre E reçoit un mouvement de rotation autour de son axe, et vient ainsi présenter les diverses parties de la bande de papier à la pointe du crayon. Le mouvement est donné au cylindre E par la machine même. A cet effet, une petite corde P, dont l'extrémité supérieure est attachée en un point de la tige du piston de la machine à vapeur, fait plusieurs tours sur la surface d'un tambour O; l'axe de ce tambour porte en arrière un petit treuil N, sur lequel s'enroule une seconde corde M, qui embrasse la gorge d'une sorte de poulie adaptée au bas du cylindre E, et dont l'extrémité est fixée en un point de cette gorge. Lorsque le piston de la machine à vapeur marche dans un certain sens, il tire la corde P; cette corde fait tourner le tambour O, en se déroulant; la corde M s'enroule sur le treuil N, et fait ainsi tourner le cylindre E. Lorsque le piston de la machine à

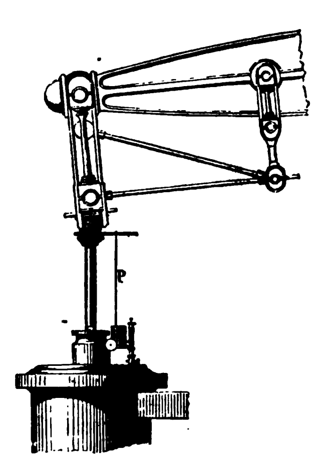


Fig. 533.

vapeur marche en sens contraire, les diverses pièces reviennent à leur position primitive, par suite de l'action d'un ressort contenu à l'intérieur du cylindre E. En sorte que la bande de papier, sur laquelle s'appuie la pointe du crayon, est animée d'un mouvement de rotation alternatif, déterminé par le mouvement alternatif du piston de la machine à vapeur. La figure 533 montre la disposition de l'indicateur, sur le fond supérieur du cylindre d'une machine à cylindre vertical et à balancier.

Pendant que le cylindre E amène successivement les diverses parties du papier qui le recouvre, sous la pointe du crayon D, celui-ci marche plus ou moins dans le sens de la longueur du cylindre A, suivant les variations de la force élastique de la vapeur. Il en résulte que le crayon trace sur le papier une ligne courbe, dont la forme dépend à la fois de ces deux mouvements, et dont la considération peut conduire à la connaissance des changements qui sont survenus successivement dans la force élastique de la vapeur. On voit ici (fig. 534) une courbe ainsi obtenue à l'aide de l'indicateur de Watt. La partie ABCD a été tracée par le crayon, pendant que le piston moteur descendait sous l'action de la vapeur; la partie DEF a été tracée pendant que le piston remontait. La ligne GH est celle que la pointe du crayon aurait parcourue, si le vide parfait avait existé dans la partie du cylindre qui était en communication avec l'indicateur. La perpendiculaire CK, abaissée d'un point quelconque C de la courbe sur cette ligne droite GH, mesure donc la quantité dont le petit piston de l'indicateur était repoussé par la pression de la vapeur, au moment où le crayon a marqué le point C; et par suite on peut en conclure la force élastique de la vapeur à ce moment, d'après les expériences faites préalablement, pour graduer l'échelle de l'indicateur. La ligne droite LM est celle qu'aurait tracée le crayon, si la tension de la vapeur eût constamment égalé celle de l'air atmosphérique, c'est-à-dire si le ressort en hélice de l'indicateur n'eût pas été tendu pendant le temps de l'expérience. La partie AB de la courbe correspond au temps pendant lequel la vapeur a agi à pleine pression. On voit qu'ensuite elle a agi avec détente, et que sa force élastique s'est ainsi abaissée au-dessous de celle de l'air at-



Fig. 534.

mosphérique. La seconde partie DEF a été tracée lorsque la partie du cylindre à laquelle l'indicateur était appliqué communiquait avec le condenseur ; pendant tout le temps que cette communication a existé, la pression marquée par l'indicateur est restée constante et inférieure à une demi-atmosphère, excepté vers la fin, où elle a augmenté par suite de la suppression anticipée de cette communication.

Non-seulement la courbe fournie par l'indicateur de Watt permet d'étudier les modifications que subit successivement la tension de la vapeur dans le cylindre d'une machine, mais elle peut encore, par l'étendue qu'elle occupe sur la feuille de papier, faire connaître la valeur numérique du travail total développé par l'action de la vapeur pendant chaque course du piston. Nous nous contenterons de signaler cette utilité du tracé que donne l'indicateur, sans entrer dans aucun détail à ce sujet, ce qui nous entraînerait beaucoup trop loin.

§ 440. **Détails économiques sur l'emploi de la vapeur comme moteur.** — Les combustibles employés pour le chauffage des chaudières à vapeur sont habituellement la houille ou le coke. Il résulte des expériences auxquelles on les a soumis, que la combustion d'un kilogramme de houille développe environ 7 500 unités de chaleur ; et que celle d'un kilogramme de coke en développe environ 6 000. D'après les tableaux des pages 620 et 621, on voit que la quantité de chaleur nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau froide en vapeur saturée ayant une force élastique de 4 à 6 atmosphères, peut être évaluée approximativement à 650 unités de chaleur. Il s'ensuit que si toute la chaleur développée par la combustion était uniquement employée à la formation de la vapeur, un kilogramme de houille produirait $11^k,5$ de vapeur ; et un kilogramme de coke en produirait $9^k,2$. Mais il n'est pas possible d'utiliser ainsi la totalité de la chaleur développée. D'une part, les gaz qui résultent de la combustion même, et qui se dégagent par la cheminée, ont nécessairement une température assez élevée, et entraînent ainsi une fraction notable de la chaleur produite. D'une autre part, l'air qui arrive dans le foyer pour entretenir la combustion contient une grande quantité d'azote ; et de plus une portion seulement de son oxygène est réellement employée : en sorte qu'une masse considérable de gaz inutile passe dans le foyer, se mêle aux produits de la combustion, et absorbe ainsi une autre portion de la chaleur développée. Si l'on joint à cela que la combustion est rarement complète dans les fourneaux des chaudières à vapeur, et que la chaleur se perd en partie, tant par le rayonne-

ment extérieur que par transmission de proche en proche dans la masse du fourneau, on verra que dans la réalité on doit être loin d'obtenir les résultats indiqués précédemment. L'expérience montre en effet que, dans les fourneaux les mieux construits, le poids de l'eau vaporisée par 1 kilogramme de houille est seulement de 7 à 8 kilogrammes.

En appliquant le frein dynamométrique (§ 200) à l'arbre auquel une machine à vapeur communique un mouvement de rotation, afin de déterminer la quantité de travail que la machine est capable de produire, on a trouvé que, dans les bonnes machines à détente et à condensation, 1 kilogramme de vapeur fournit environ 30 000 kilogrammètres de travail utile. Et si l'on tient compte de ce que nous avons dit relativement à la quantité de vapeur produite par un kilogramme de houille, on verra que la consommation de ce combustible, par force de cheval et par heure, est d'environ $1^k,2$.

§ 441. Pour atteindre les résultats qui viennent d'être indiqués, il est nécessaire d'employer tous les moyens possibles pour s'opposer à la condensation de la vapeur, depuis le moment où elle se forme dans la chaudière, jusqu'au moment où elle cesse complétement d'agir dans la machine. A cet effet, le tuyau qui mène la vapeur de la chaudière à la machine doit être enveloppé de matières peu conductrices, telles que des nattes de paille ou de jonc, ou mieux encore de la laine. Il faut aussi que le cylindre soit préservé du rayonnement extérieur. On y parvient en disposant autour de lui un second cylindre de dimensions un peu plus grandes, et faisant circuler de la vapeur dans l'espace annulaire compris entre les deux, espace auquel on donne le nom de *chemise*. Mais ce moyen peut être remplacé avec avantage par un autre qui consiste à entourer le cylindre d'une couche de charbon pilé, maintenu par une enveloppe de bois.

Si la température du cylindre d'une machine n'est pas maintenue suffisamment élevée, par l'emploi de moyens tels que ceux qui viennent d'être indiqués, il en résulte une perte de vapeur beaucoup plus grande qu'on ne pourrait le croire au premier abord. Il semblerait en effet qu'il ne doit y avoir de vapeur perdue que celle qui se condense pour restituer au cylindre la chaleur qui s'en va par le rayonnement extérieur; mais, en y réfléchissant, on reconnaît sans peine que la quantité de vapeur perdue doit être beaucoup plus grande. En effet, lorsque la vapeur vient de la chaudière dans le cylindre, elle se condense d'abord en partie, pour élever la température des parois avec lesquelles elle est en contact. Mais lorsqu'elle a agi complétement sur le

piston, et qu'elle est mise en communication avec le condenseur, elle perd une grande partie de sa force élastique; et l'eau provenant de la condensation qui s'est opérée dans le cylindre se vaporise de nouveau, pour se mêler à elle et se rendre dans le condenseur. Cette vaporisation, qui se produit dans le cylindre même, en refroidit les parois; et lorsque de nouvelle vapeur vient de la chaudière, elle donne lieu à la reproduction des mêmes circonstances. On conçoit dès lors combien il est important de s'opposer au refroidissement du cylindre par le rayonnement extérieur, puisque c'est une cause de ces condensations et vaporisations successives à son intérieur.

Lorsque le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière à la machine la prend à peu de distance de la surface du liquide en ébullition, elle contient de l'eau en suspension, qui est ainsi entraînée jusque dans le cylindre. Cette eau occasionne une perte notable, non-seulement parce que la chaleur qui a servi à élever sa température ne produit aucun effet, mais surtout parce qu'étant arrivée dans le cylindre, elle s'y vaporise comme on vient de l'expliquer, et y produit un abaissement notable de la température des parois. Aussi doit-on faire en sorte que la prise de vapeur, dans la chaudière, se fasse de manière à éviter cette circonstance défavorable. On y arrive en surmontant la chaudière d'une capacité dans laquelle la vapeur s'accumule, et en faisant partir le tuyau du haut de ce réservoir de vapeur. Par ce moyen, l'eau contenue en suspension dans la vapeur se dépose peu à peu en retombant dans la chaudière ; et la vapeur qui se trouve dans le haut du réservoir en est à peu près complétement débarrassée.

§ 442. **Machines à vapeurs combinées.** — On n'utilise en réalité, dans les machines à vapeur, qu'une très-petite portion de la chaleur employée à la production de la vapeur. On voit, en effet, qu'au moment où la vapeur cesse d'agir dans le cylindre, et où on la fait communiquer, soit avec le condenseur, soit avec l'atmosphère, elle contient encore une quantité de chaleur considérable, dont la plus grande partie est à l'état latent. On a eu l'idée d'utiliser cette chaleur en l'employant à la vaporisation d'un liquide plus volatil que l'eau, de manière à faire servir la vapeur de ce liquide à la production d'une nouvelle quantité de travail. On a pris successivement pour ce second liquide, de l'éther, du sulfure de carbone, du perchlorure de carbone, et du chloroforme ; c'est à ce dernier qu'on s'est arrêté.

Les machines construites d'après cette idée sont mises en mouvement à la fois par la vapeur d'eau et par la vapeur de chloroforme : on les *désigne sous* le nom de *machines à vapeurs combinées*.

Deux pistons séparés se meuvent chacun dans un cylindre, et reçoivent l'un l'action de la vapeur d'eau, l'autre celle de la vapeur de chloroforme; ces deux pistons sont employés simultanément pour agir sur un même arbre tournant. Lorsque la vapeur d'eau a cessé d'agir dans le cylindre qui lui est destiné, elle se rend dans une capacité où elle se condense par le contact de vases spéciaux contenant le chloroforme. Ce liquide se vaporise en même temps, et sa vapeur, ayant une force élastique assez grande, vient agir dans le second cylindre, pendant que de nouvelle vapeur d'eau agit dans le premier. Enfin la vapeur de chloroforme, après avoir exercé son action, passe dans une capacité où elle est condensée par l'eau froide qui rafraîchit constamment les parois extérieures des vases qui la contiennent.

Il est bien clair que l'emploi simultané de la vapeur d'eau et de la vapeur d'un liquide plus volatil doit amener une grande économie de combustible. Mais cette économie est accompagnée de la perte d'une partie du liquide volatil que l'on emploie, perte qu'on peut rendre assez faible, mais qu'on ne peut pas éviter complétement, et qui a une importance d'autant plus grande que ce liquide est plus cher. Il paraît cependant que les machines à vapeurs combinées que l'on a employées jusqu'à présent ont donné de bons résultats, au point de vue économique.

§ 443. **Machine à air chaud d'Éricsson.** — Le moyen dont nous venons de parler, pour utiliser une partie de la chaleur que la vapeur renferme surtout à l'état latent, lorsqu'elle a cessé d'agir dans une machine à vapeur, ne remédie que très-faiblement à la perte énorme de chaleur que nous avons signalée au commencement du paragraphe précédent. Aussi a-t-on cherché d'autres moyens pour éviter cette perte.

On a pensé avec raison depuis longtemps qu'une des meilleures manières d'y arriver consisterait à substituer l'air chaud à la vapeur d'eau. On comprend, en effet, que si l'on peut augmenter la force élastique d'une masse d'air contenue dans une capacité fermée, en élevant sa température, et ensuite faire agir cet air chaud dans une machine disposée de la même manière qu'une machine à vapeur, en le laissant échapper dans l'atmosphère après qu'il aura exercé son action sur le piston de la machine, au moment où l'air sortira de la machine il conservera encore une portion de la chaleur qui lui aura été communiquée; mais cette chaleur, perdue pour l'effet que l'on veut produire, sera une fraction beaucoup moins grande de la chaleur totale que l'on aura dépensée, que dans les machines à vapeur : on ne retrouve pas dans ce cas la quantité considérable de chaleur qui passe à l'état

latent dans la réduction de l'eau en vapeur, et qui est emportée par la vapeur après qu'elle a cessé d'agir, sans qu'il en résulte la production d'aucune quantité de travail.

Cependant on n'était pas parvenu, jusqu'à ces derniers temps, à réaliser une machine à air chaud qui pût lutter avantageusement avec les machines à vapeur. La principale difficulté consistait en ce que, si l'on ne voulait pas élever beaucoup la température de l'air, on se trouvait obligé de donner à la machine des dimensions incomparablement plus grandes que celles d'une machine à vapeur de même force; et que, d'un autre côté, si, pour diminuer ces dimensions, on se décidait à porter l'air à une température très-élevée, il en résultait des inconvénients d'un autre genre, et en particulier une perte de chaleur comparable à celle qu'occasionnent les machines à vapeur. M. Ericcson est parvenu à lever ces difficultés, en adoptant une disposition particulière que nous allons faire connaître.

Lorsque l'air chaud a cessé d'agir dans la machine, et qu'on le laisse s'échapper dans l'atmosphère, il emporte avec lui une grande partie de la chaleur qui lui a été donnée tout d'abord. Si l'on pouvait lui reprendre cette chaleur pour la faire servir à l'échauffement d'une nouvelle quantité d'air, il est clair que l'on aurait obvié à l'inconvénient principal des machines à feu, c'est-à-dire à la perte d'une portion considérable de la chaleur dépensée. Or, c'est précisément là ce qu'a fait M. Ericcson. Dans la machine qu'il a imaginée, l'air chaud sort du cylindre pour se rendre dans l'atmosphère, en traversant un grand nombre de toiles métalliques; cet air se trouve ainsi en contact avec une très-grande surface du métal qui forme ces toiles, et lui abandonne la presque totalité de l'excès de chaleur qu'il renferme. Ensuite, lorsqu'une nouvelle quantité d'air doit arriver dans le cylindre de la machine, après avoir été préalablement chauffé, cet air traverse d'abord les mêmes toiles métalliques, qui lui restituent la chaleur enlevée à l'air sortant; et il suffit de lui donner en outre une faible augmentation de température, en le soumettant à l'influence d'un foyer, pour qu'il puisse agir convenablement sur le piston de la machine.

La figure 535 représente une des machines construites par M. Ericcson, d'après le système que nous venons d'indiquer; cette machine fonctionne dans un des ateliers de New-York. Un piston A se meut dans un cylindre B, qui communique librement avec l'atmosphère par les ouvertures *a*, *a*. Un second piston C, lié invariablement au premier par les tiges de fer *d*, *d*, et d'un diamètre notablement plus petit, se meut en même temps dans un

cylindre D qui surmonte le cylindre B ; la partie du cylindre D qui se trouve au-dessous du piston C communique également avec l'atmosphère par les ouvertures *a*, *a*. Le piston C est muni d'une tige E qui traverse le fond supérieur du cylindre D, et va s'articuler à l'une des extrémités d'un balancier qui n'est pas représenté ici. Un réservoir cylindrique F est installé à côté des

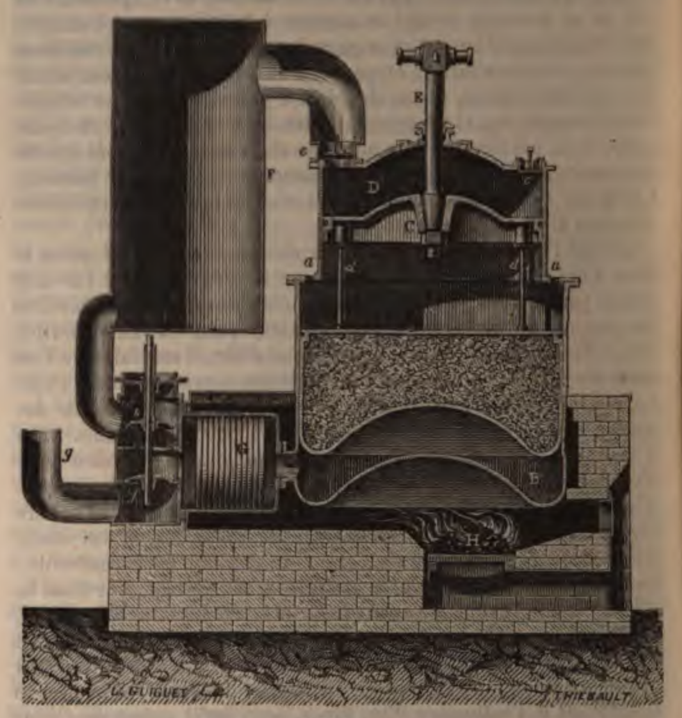


Fig. 535.

cylindres B, D, et est destiné à renfermer de l'air comprimé. Le haut du cylindre D communique d'une part avec l'atmosphère par la soupape *c* s'ouvrant de haut en bas, et d'une autre part avec le réservoir F par la soupape *e* s'ouvrant de bas en haut. L'air contenu dans le réservoir F peut se rendre dans le cylindre B, en traversant l'ouverture de la soupape *b*, ainsi que l'espace G

contenant les toiles métalliques dont nous avons parlé. La soupape *b* étant fermée, et la soupape *f* étant ouverte, l'air contenu dans le cylindre B peut s'échapper dans l'atmosphère en traversant les toiles métalliques G, l'ouverture de la soupape *f*, et le tuyau de dégagement *g*. Un foyer H est installé sous le fond du cylindre B, et la flamme qui s'en échappe circule dans un espace vide ménagé autour de la partie inférieure de ce cylindre avant de se rendre dans la cheminée. Le piston A présente une assez grande épaisseur, et est rempli à son intérieur d'un mélange d'argile et de charbon en poudre, pour éviter que la chaleur ne se perde en le traversant.

Voici maintenant comment la machine fonctionne. La soupape *b* étant ouverte, et la soupape *f* fermée, l'air comprimé du réservoir F se rend dans le cylindre B, en traversant les toiles métalliques G; il s'échauffe d'abord par le contact des fils qui composent ces toiles, et ensuite par l'action du foyer H, qui se transmet à lui par l'intermédiaire des parois du cylindre B. Le piston A monte sous la pression qu'il éprouve de la part de cet air, dont la force élastique est supérieure à celle de l'air atmosphérique, et fait monter en même temps que lui le piston C. L'air contenu au-dessus de ce second piston, et qui s'y est précédemment introduit par la soupape *c*, est comprimé et refoulé dans le réservoir F par la soupape *e*; en sorte que le réservoir perd d'un côté une portion de l'air qu'il renfermait, et en gagne d'un autre côté une quantité égale, ce qui entretient une pression constante à son intérieur. Lorsque les deux pistons A, C, se sont ainsi élevés jusqu'à la partie supérieure de leur course, la soupape *b* se ferme, et la soupape *f* s'ouvre; l'air contenu au-dessous du piston A peut donc se rendre dans l'atmosphère, en traversant les toiles métalliques G en sens contraire du sens dans lequel il les avait traversées précédemment. Alors les pistons A, C redescendent en vertu de leur propre poids, ou bien par l'action de contre-poids disposés pour cela; en même temps la soupape *e* se ferme et la soupape *c* s'ouvre, de sorte que le haut du cylindre D se remplit d'air atmosphérique venant par cette dernière soupape. Lorsque les pistons A, C sont arrivés au bas de leur course, la soupape *f* se ferme, la soupape *b* s'ouvre, et le jeu de la machine recommence comme précédemment.

On voit que cette machine est à simple effet; la force élastique de l'air ne sert qu'à pousser la tige E de bas en haut, et ne contribue en aucune manière à la faire redescendre. Mais deux machines de ce genre, agissant alternativement aux deux extrémités

d'un même balancier, le font mouvoir en définitive de la même manière qu'une machine à double effet agissant sur une seule de ces deux extrémités.

La machine que nous venons de décrire est la première machine à air chaud que M. Éricсson ait fait connaître comme pouvant remplacer avantageusement la machine à vapeur. L'économie de combustible qu'on en attendait ne s'est pas complétement réalisée. De plus l'emploi des toiles métalliques destinées à reprendre à l'air sortant une partie de la chaleur qu'il renferme, n'a pas donné d'aussi bons résultats qu'on l'avait espéré ; et M. Éricсson les a supprimées dans les nouvelles machines à air chaud qu'il construit. Quoi qu'il en soit, on doit considérer cette machine à air chaud comme un premier pas dans une voie qui a évidemment de l'avenir.

D'autres tentatives ont été faites pour substituer l'air chaud à la vapeur d'eau. Nous citerons seulement la machine de M. Lenoir dans laquelle l'air est chauffé dans le cylindre même par la combustion d'une petite quantité de gaz d'éclairage ; une étincelle électrique, partant à un moment convenable, détermine la combustion du gaz. Cette machine est appelée à jouer un rôle important dans l'industrie aussi bien que la machine à air chaud d'Éricсson.

§ 444. **Bateaux à vapeur.** — La première idée d'appliquer la vapeur à la navigation est due à Papin. Il l'a développée dans un ouvrage imprimé en 1596, en indiquant un moyen de transformer le mouvement rectiligne alternatif d'un piston, en un mouvement de rotation continu de l'arbre qui porte à ses extrémités les *rames tournantes* ou roues.

En 1775, Périer construisit à Paris le premier bateau auquel on ait tenté d'appliquer la vapeur. Ce bateau ne servit qu'à faire des expériences.

En 1781, Jouffroy établit sur la Saône un bateau à vapeur qui navigua réellement pendant quelque temps.

Mais ce n'est qu'en 1807 que l'on trouve le premier bateau à vapeur auquel on n'ait pas renoncé après l'avoir essayé. Ce bateau fut construit par Fulton à New-York (Amérique), et fut employé au transport des voyageurs et des marchandises. Quelques années après, en 1812, un bateau du même genre fut mis en activité en Écosse, sur la Clyde, entre Glasgow et Greenock. Depuis cette époque, la navigation à vapeur a fait des progrès immenses, et a pris un développement considérable.

La disposition adoptée, pour appliquer la force de la vapeur à la production du mouvement du bateau, est facile à comprendre, d'a-

près ce que nous avons dit des machines à vapeur. Il suffit, en effet, d'employer les moyens indiqués pour transformer le mouvement de va-et-vient du piston d'une machine, en un mouvement de rotation d'un arbre horizontal qui porte les roues à ses deux extrémités (§ 334). On emploie habituellement deux machines à vapeur distinctes, dont chacune est à double effet, et on les fait agir sur le même arbre tournant. Les manivelles au moyen desquelles les deux pistons agissent sur l'arbre, soit directement, soit par l'intermédiaire de bielles et même de balanciers, sont disposées à angle droit l'une sur l'autre; en sorte que, lorsque l'une d'elles est horizontale, l'autre est verticale, et inversement. Cette disposition a pour objet de corriger en grande partie ce qu'il y a d'irrégulier dans la transmission du mouvement à un arbre tournant, par l'intermédiaire d'une manivelle (§ 131); lorsque l'une des manivelles est placée de manière que le piston qui lui correspond ne puisse produire que peu d'effet, l'autre, au contraire, se trouve dans des conditions convenables pour que le second piston développe toute son action.

§ 445. **Locomotives.** — L'invention des locomotives, dont on se sert pour traîner les convois de wagons sur les chemins de fer, est toute récente. Cependant les essais auxquels on s'est livré pour construire des voitures mues par la vapeur remontent jusqu'à l'année 1769. A cette époque un ingénieur français, Cugnot, construisit une voiture à vapeur destinée à marcher sur les routes ordinaires. Les expériences faites sur cette voiture réussirent, en ce sens que la vapeur la mettait en mouvement sur le sol, et lui donnait une vitesse d'environ 4 kilomètres par heure ; mais ce mouvement ne pouvait s'entretenir que peu de temps, parce que la chaudière n'était pas capable de fournir assez de vapeur pour la consommation de la machine.

Nous avons dit (§ 434) qu'une chaudière ne pouvait fournir une quantité donnée de vapeur, dans un temps déterminé, qu'autant que la surface de chauffe avait une étendue suffisamment grande. C'est la difficulté de satisfaire à cette condition, dans la construction d'une chaudière portée par la voiture elle-même, qui a fait que les divers essais auxquels ont s'est livré sont restés longtemps sans succès. On ne pouvait pas parvenir à donner à la surface de chauffe de la chaudière une étendue qui fût en rapport avec la grande quantité de vapeur que nécessite la marche rapide d'une locomotive. Ce n'est qu'en 1828 que ce problème fut résolu de la manière la plus heureuse par M. Séguin. La forme qu'il a imaginée pour les chaudières des locomotives est celle qu'on leur donne encore maintenant. Nous verrons en

quoi consiste cette forme, en donnant la description complète d'une locomotive.

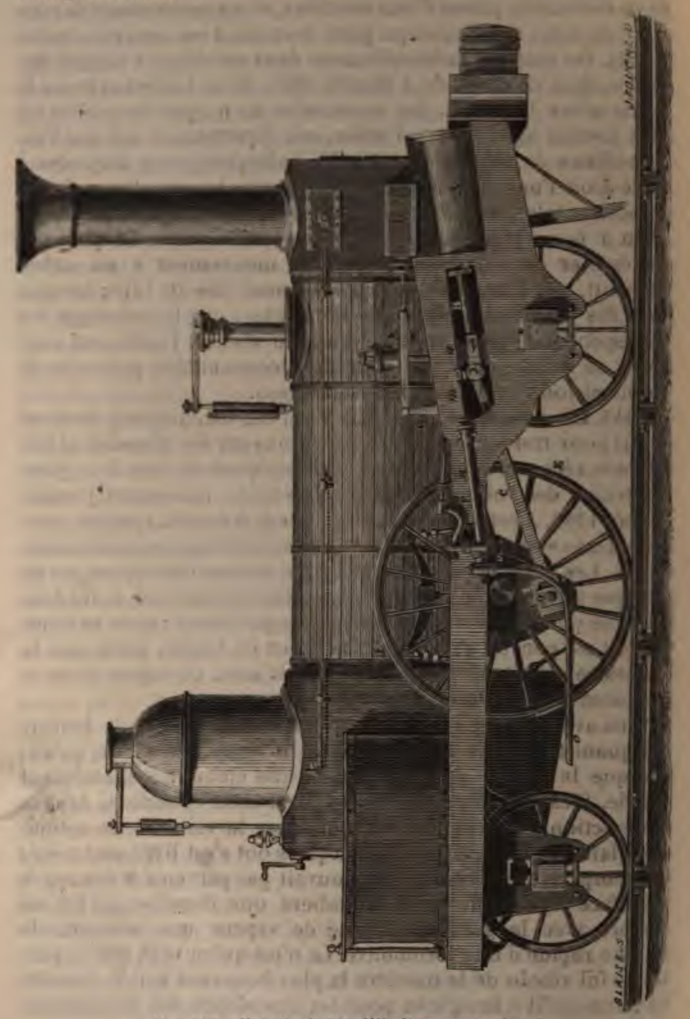


Fig. 536. (Échelle de 20 millimètres pour *mètre*.)

§ 446. La figure 536 représente une des locomotives du chemin de fer de Paris à Rouen ; la figure 537 en est une coupe longitudinale, et les figures 539 et 540 en sont des coupes transversales faites aux deux extrémités.

Deux cylindres A (fig. 536) sont placés à l'avant de la locomotive, un de chaque côté. Ces deux cylindres sont ici légèrement inclinés ; mais souvent ils sont placés horizontalement. Un piston se meut dans chacun de ces deux cylindres, et y reçoit l'action de la vapeur, tantôt sur une de ses faces, tantôt sur l'autre. Cela constitue donc en réalité deux machines à vapeur à double effet, comme dans les bateaux à vapeur (§ 444). La tige B de chaque piston est dirigée dans son mouvement par les glissières *a*, *a*, fixées à son extrémité. Cette tige est articulée à une bielle C, qui saisit un bouton D fixé à l'une des roues motrices E ; ce bouton, situé à une certaine distance du centre de la roue, fait fonction de manivelle. On conçoit donc que le mouvement de va-et-vient du piston détermine le mouvement de rotation des roues motrices. Les deux manivelles, sur lesquelles agissent les deux pistons, sont d'ailleurs disposées à angle droit l'une sur l'autre, comme cela a lieu dans les bateaux à vapeur (§ 444), et pour le même motif.

La distribution de la vapeur dans le cylindre se fait au moyen de tiroirs mus par des excentriques circulaires que porte l'essieu des roues motrices. Le mécanisme de la distribution se voit en partie sur la figure 537. L'excentrique F donne un mouvement de va-et-vient à la bielle G ; cette bielle se termine en *b* par une encoche qui saisit l'extrémité inférieure d'un levier H (fig. 536) ; ce levier, mobile autour de son milieu, prend un mouvement d'oscillation, par suite de sa liaison à l'excentrique, et donne lieu au mouvement de va-et-vient de la tige K du tiroir qui est contenu dans la boîte à vapeur L.

La locomotive devant pouvoir marcher à volonté dans un sens ou dans l'autre, il est nécessaire que le mécanicien ait à sa disposition la possibilité de modifier la distribution de la vapeur, de manière à déterminer tantôt la marche en avant, tantôt la marche en arrière. Il est aisé de voir ce qu'il faut faire pour cela. Lorsque l'un des pistons se trouve au milieu de sa course, la vapeur doit le presser sur sa face antérieure ou sur sa face postérieure, suivant que la locomotive marche dans un sens ou dans l'autre ; dans l'un de ces deux cas, le tiroir doit se trouver vers l'une des extrémités de la boîte à vapeur ; et dans l'autre cas, il doit se trouver vers l'extrémité opposée. On voit donc que, pour changer le sens de la marche, il suffit de faire conduire le tiroir par

un second excentrique, qui soit placé autrement que le premier

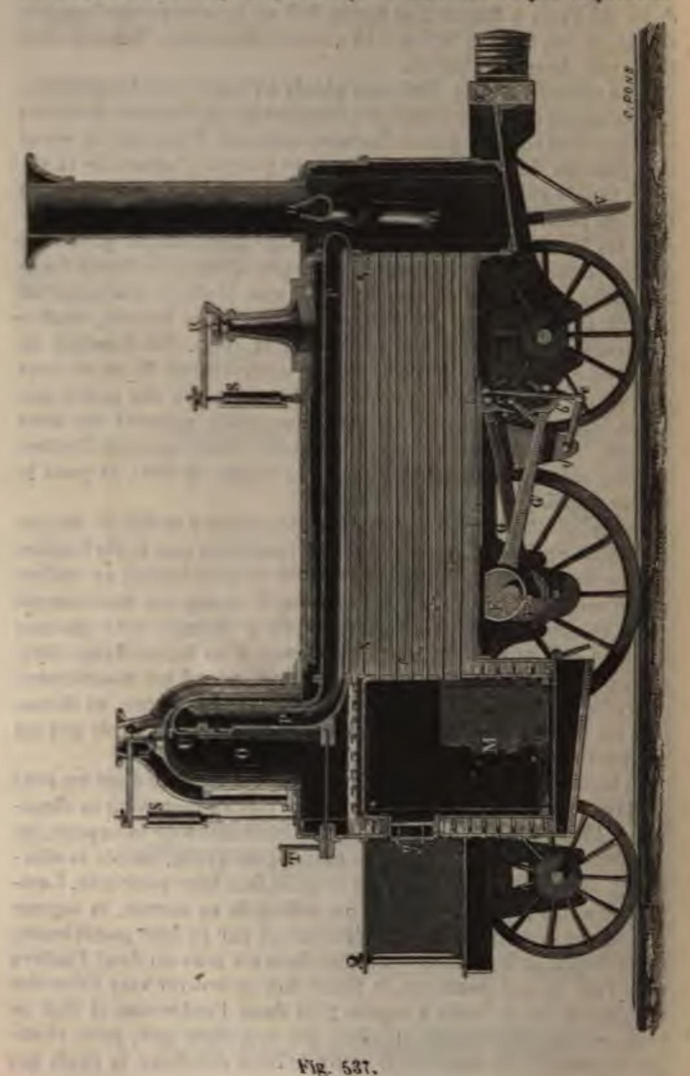


Fig. 537.

sur l'essieu des roues motrices. C'est pour cela que cet essieu porte deux excentriques F, F', pour mettre en mouvement chacun des tiroirs. Les bielles G, G', mues par ces excentriques, se terminent par deux encoches *b*, *b'*, tournées en sens contraires, et destinées à saisir l'une ou l'autre le bouton adapté à l'extrémité inférieure du levier vertical H. Un levier coudé *cde*, mobile autour du point *d*, sert à soutenir les encoches *b*, *b'* à une hauteur convenable, au moyen de deux tringles qui partent du point *e*. Une longue tringle *f*, articulée à l'extrémité *c* de ce levier, vient se terminer à la portée du mécanicien, qui, en la tirant, ou la poussant, peut ainsi faire saisir le bras de levier H par l'encoche *b*, ou par l'encoche *b'*.



Fig. 538.

La disposition qui vient d'être indiquée, pour changer à volonté le sens de la marche d'une locomotive, est celle qui avait été adoptée tout d'abord. Elle est généralement remplacée par une autre disposition (fig. 538) qui n'est qu'une simple modification de la première, mais qui présente de grands avantages. Au lieu que les deux bielles d'excentriques G, G', portent à leurs extrémités deux encoches *b*, *b'* (fig. 537), destinées à saisir l'une ou l'autre le bouton par l'intermédiaire duquel le mouvement de va-et-vient est transmis au tiroir, on a réuni les extrémités de ces bielles par une coulisse *bb'* (fig. 538), dans laquelle s'engage ce bouton *m*. La coulisse est, pour ainsi dire, formée par la réunion des deux encoches, dont les bords, au lieu d'aller en s'écartant pour pou-

voir saisir plus facilement le bouton du tiroir, s'allongent au contraire en restant parallèles, de manière à aller sans discontinuité de l'extrémité de l'une des deux bielles à l'extrémité de l'autre. Par suite de cette modification, on comprend que, lorsqu'on veut changer le sens de la marche de la locomotive, en élevant ou abaissant les extrémités des deux bielles d'excentriques, par le moyen du levier coudé *cde* et de la tringle *f*, on n'a pas à craindre que le bouton *m* ne soit pas saisi convenablement par l'extrémité de la bielle avec laquelle on veut le mettre en relation. Mais l'emploi de la coulisse présente un avantage bien plus important. Si on la soulève ou qu'on l'abaisse, de manière que le bouton *m* soit à l'une ou l'autre de ses extrémités, le tiroir ne reçoit son mouvement de va-et-vient que de l'un des deux excentriques, de celui dont la bielle aboutit directement au bouton *m*; la seconde bielle se meut en faisant osciller la coulisse, sans qu'il en résulte aucune influence sur le mouvement du tiroir, qui s'effectue exactement de la même manière que si cette seconde bielle et la coulisse n'existaient pas. Mais si l'on ne donne pas tout à fait à la coulisse l'une des deux positions extrêmes que nous venons de considérer, si on la maintient à une hauteur telle que le bouton *m* se trouve à une certaine distance de l'une de ses extrémités, ce bouton recevra et transmettra au tiroir un mouvement de va-et-vient qui ne sera pas produit par un seul des deux excentriques; la coulisse, en oscillant sous l'action simultanée des deux bielles G, G′, fera mouvoir le bouton *m* autrement qu'il ne se mouvrait sous l'action d'une seule de ces bielles. Or on a reconnu qu'ainsi la vapeur agit avec un degré de détente différent, suivant que le bouton *m* est dans telle ou telle position par rapport aux extrémités de la coulisse; l'emploi de cette coulisse permet donc de faire varier à volonté la détente de la vapeur, pendant que la locomotive est en marche, ce qui est un résultat des plus importants (§ 430). Pour produire la marche en avant, il faut que le bouton *m* soit dans l'une des deux moitiés de la coulisse, et pour la marche en arrière, il doit être dans l'autre moitié; on fait varier la détente dans l'un ou l'autre cas, en soulevant la coulisse de telle manière que le bouton *m* occupe des positions différentes dans chacune de ces deux moitiés. Le contre-poids *n* est destiné à équilibrer le poids de la coulisse et des deux bielles d'excentrique, afin que l'ensemble de ces pièces puisse être plus facilement maintenu à la hauteur voulue suivant le sens dans lequel on veut faire marcher la locomotive et le degré de détente que l'on veut produire. La coulisse dont nous venons de faire connaître les avantages est habituellement dési-

gnée sous le nom de *coulisse de Stephenson*: l'ingénieur anglais Stephenson est le premier qui l'ait introduite dans la construction des locomotives.

Le foyer de la locomotive est en M. Le combustible, qui est ordinairement du coke, s'introduit par une petite porte *g*. Le foyer est entouré de tous côtés par deux enveloppes, entre lesquelles se répand une partie de l'eau de la chaudière; son fond supérieur est également recouvert d'une certaine épaisseur d'eau. La flamme, en quittant le foyer, traverse un grand nombre de tubes qui sont établis à côté les uns des autres, dans le sens de la longueur de la locomotive, et entre lesquels se trouve la plus grande partie de l'eau à vaporiser; les gaz qui résultent de la combustion se rendent ainsi dans un espace situé à l'avant de la locomotive, et s'échappent par la cheminée qui surmonte cet espace.

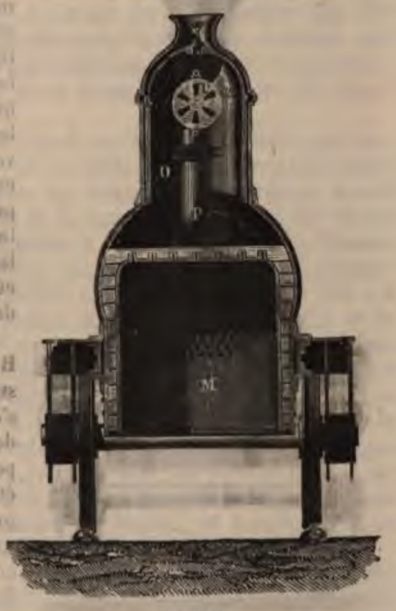


Fig. 539.

La figure 539, qui est une coupe transversale faite dans le foyer, montre les extrémités de ces tubes, dont le nombre s'élève jusqu'à 100 et même 150; leur diamètre est de 4 à 5 centimètres. Il résulte de cette disposition que la surface de chauffe peut atteindre une étendue de 50 et même 80 mètres carrés; et c'est cette circonstance qui permet à la locomotive de produire la grande quantité de vapeur qu'elle consomme dans sa marche rapide.

Le corps de la chaudière consiste principalement en un cylindre horizontal N, au milieu duquel sont installés les nombreux tubes dont nous venons de parler. Un réservoir de vapeur O est placé immédiatement au-dessus du foyer. Un large tuyau A part du haut de ce réservoir, traverse la chaudière dans toute sa lon-

gueur, et vient se rendre à l'extrémité antérieure de la locomotive, où il se divise en deux pour conduire la vapeur dans les cylindres. Lorsque la vapeur a cessé d'agir sur les pistons, elle s'échappe par deux tuyaux Q, dont la disposition est indiquée par la figure 540, qui est une coupe transversale faite dans la partie antérieure de la locomotive. Ces deux tuyaux se réunissent à leurs extrémités, et débouchent au bas de la cheminée ; il en résulte que la vapeur, en quittant les cylindres, est lancée suivant l'axe de la cheminée, et le jet de vapeur, qui se reproduit ainsi à chaque instant, pendant la marche de la machine, active le tirage, et, par suite, la combustion dans le foyer.



Fig. 540.

Deux soupapes de sûreté R (fig. 537) sont installées sur la chaudière, afin de s'opposer à ce que la tension de la vapeur dépasse la limite pour laquelle la chaudière a été construite. Les leviers qui pressent sur ces soupapes ne sont pas chargés de poids, comme dans les machines fixes, parce que les irrégularités qui se présentent toujours dans le mouvement gêneraient l'action de ces poids. Au lieu de cela, chacun de ces leviers est soumis, à son extrémité, à une force de traction produite par un ressort contenu dans une enveloppe S ; et l'on règle la grandeur de cette force de traction en serrant convenablement l'écrou adapté à la tige qui part du ressort, et situé au-dessus du levier de la soupape.

La manivelle T, placée à la portée du mécanicien, sert à ouvrir ou à fermer l'entrée U du tuyau P (fig. 537 et 539). Lorsque la locomotive est arrêtée, il suffit de tourner cette manivelle, pour que la vapeur, pénétrant dans le tuyau P, et par suite dans les cylindres, vienne presser les pistons et mettre la machine

en mouvement. Si l'on veut faire cesser l'action de la vapeur, on tourne cette manivelle en sens contraire, et le mouvement ne continue plus qu'en vertu de la vitesse acquise ; dans ce cas, les pistons se meuvent toujours dans les cylindres, par suite de leur liaison avec les roues motrices; mais ils n'exercent sur la marche de la locomotive qu'une action de résistance en raison des frottements qu'occasionne leur mouvement.

La pièce V, que l'on voit à l'avant de la locomotive (fig. 536 et 537), est destinée à débarrasser les rails des obstacles qui pourraient s'y trouver accidentellement, et qui pourraient occasionner un déraillement. Cette pièce porte le nom de *chasse-pierre*.

Un wagon spécial, auquel on donne le nom de *tender*, suit toujours la locomotive, et lui sert de réservoir pour l'eau et le combustible. C'est dans le tender que l'eau est constamment puisée par les pompes alimentaires de la machine, pour être introduite dans la chaudière, et y entretenir un niveau constant. Chaque piston moteur de la locomotive fait mouvoir une pompe alimentaire, dont on voit la disposition complète sur la figure 536. La tige *m* du piston de cette pompe est attachée à l'extrémité de la tige du piston moteur. Le mouvement de va-et-vient de ce dernier piston détermine en conséquence un mouvement analogue du premier, dans le petit corps de pompe *n*. L'eau du tender se trouve ainsi aspirée par le tuyau *o*, et ensuite refoulée par le tuyau *p* qui la conduit à l'intérieur de la chaudière. Des soupapes sont installées dans ces deux tuyaux, de part et d'autre du corps de pompe *n*, de manière à permettre à l'eau de se mouvoir dans le sens que nous venons d'indiquer, et à s'opposer à ce qu'elle prenne le mouvement contraire.

§ 447. **Locomobiles.** — On donne le nom de *machine locomobile*, ou simplement de *locomobile*, à une machine à vapeur destinée à fonctionner comme machine fixe, et montée sur des roues de manière à pouvoir être transportée facilement d'un lieu à un autre. L'usage des locomobiles tend à se répandre de plus en plus depuis quelques années, surtout pour certains travaux de l'agriculture. La figure 541 représente une machine de ce genre construite dans les ateliers de M. Calla.

Pour que la machine et sa chaudière puissent être facilement transportées d'un lieu à un autre, il faut évidemment que le tout occupe le moins de place possible. Aussi a-t-on adopté pour cela la même disposition que pour les locomotives, comme on peut le voir sur la figure. Une locomobile ne diffère d'une locomotive qu'en ce que le mouvement de va-et-vient du piston soumis à

l'action de la vapeur, n'est pas employé pour produire le mouvement de rotation des roues qui supportent la machine, en sorte que le cylindre dans lequel le piston se meut peut être placé autrement. Le cylindre est en A : l'extrémité B de la tige du piston

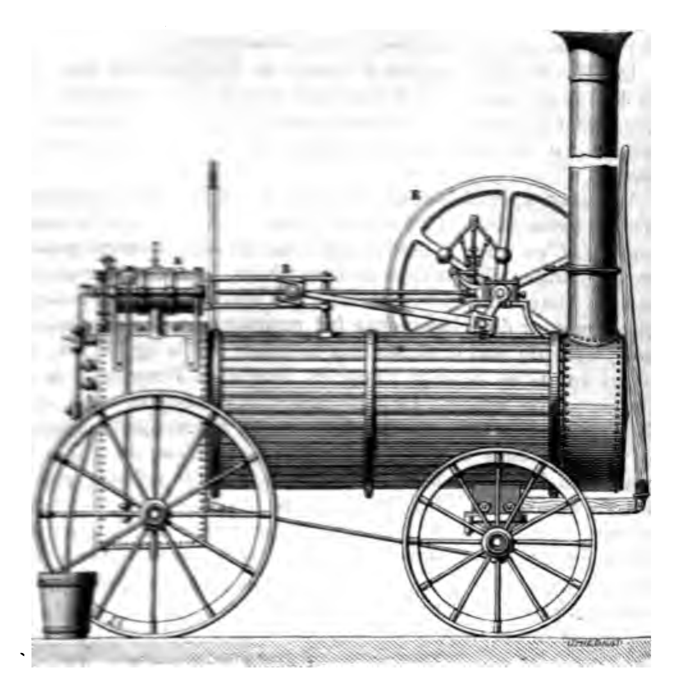


Fig. 541.

s'articule à une bielle BC; et cette bielle saisit le bouton C d'une manivelle CD adaptée à un arbre horizontal D. Le mouvement de va-et-vient du piston dans le cylindre A détermine la rotation de l'arbre D. Un volant E, monté sur cet arbre, sert à régulariser le mouvement ; en outre, ce volant sert à transmettre le mouvement à tel mécanisme qu'on veut, au moyen d'une courroie sans fin qu'on fait passer sur son contour.

La machine est munie de deux limons que l'on voit à droite de la figure 541, où ils sont relevés le long de la cheminée. Quand on veut la transporter dans un autre lieu, on y attelle un che-

val qui l'emmène comme une voiture ordinaire. Mais lorsqu'elle a été ainsi amenée dans le lieu où l'on doit s'en servir, il faut avoir soin de caler solidement les roues, afin qu'elle ne se déplace pas pendant qu'elle fonctionne.

EMPLOI DE L'ÉLECTRICITÉ COMME MOTEUR.

§ 448. Ce n'est que depuis un petit nombre d'années qu'on a trouvé le moyen d'employer l'électricité comme force motrice. L'usage des machines que l'on a imaginées pour cela est jusqu'à présent extrêmement restreint; mais nous n'en devons pas moins faire connaître le principe, tant parce qu'on y voit une application très-ingénieuse des progrès des sciences, que parce que ce genre de machines est peut-être destiné à prendre une place importante parmi les moteurs dont se sert l'industrie.

Nous devons naturellement nous occuper tout d'abord d'indiquer le moyen que l'on a imaginé pour développer une force à l'aide de l'électricité. Nous verrons ensuite quel parti on a pu, jusqu'à présent, tirer de cette force.

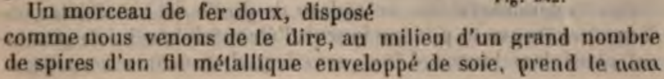
§ 449. **Électro-aimant.** — Supposons que l'on prenne un morceau de fer doux, ayant par exemple la forme d'un cylindre, et qu'on enroule autour de lui un fil métallique enveloppé de soie, en lui faisant faire un grand nombre de tours. Si l'on vient à faire passer le long de ce fil métallique un courant d'électricité produit par une pile, le cylindre de fer doux se trouve immédiatement transformé en un aimant; l'aimantation disparaît aussitôt que le courant électrique cesse de passer.

On peut courber le morceau de fer, pour lui donner la forme d'un fer à cheval, comme on le voit sur la figure 542. Lorsque le courant électrique est établi, l'aimant artificiel AA se trouve avoir ses deux pôles rapprochés l'un de l'autre; et l'on peut les mettre en contact avec un second morceau de fer B, supportant un poids qui est ainsi soutenu par l'aimant, si son énergie est suffisante. Dès qu'on supprime le courant électrique, la force qui supportait la pièce B est anéantie, et cette pièce tombe.



Fig. 542.

Un morceau de fer doux, disposé


comme nous venons de le dire, au milieu d'un grand nombre de spires d'un fil métallique enveloppé de soie, prend le nom

d'électro-aimant. Souvent un électro-aimant, au lieu d'être un cylindre de fer courbé en fer à cheval, est formé de deux cylindres de fer placés à côté l'un de l'autre, et réunis à l'une de leurs extrémités par une pièce de fer transversale qui y est fixée.

§ 450. **Télégraphe électrique.** — L'invention toute récente et si merveilleuse du télégraphe électrique est fondée sur la propriété de l'électro-aimant de prendre et de perdre l'aimantation avec une extrême rapidité, suivant qu'on établit ou qu'on interrompt le courant électrique, lors même que la longueur du fil dans lequel passe ce courant est très-considérable. Il est aisé de concevoir en effet comment on peut utiliser cette propriété, pour déterminer presque instantanément la production de divers signes à une très-grande distance.

Imaginons pour cela qu'une pile soit établie à Paris, par exemple, qu'un fil métallique parte du pôle positif de cette pile, et aille jusqu'à Rouen ; que là ce fil s'enroule un grand nombre de fois autour d'un morceau de fer disposé en fer à cheval, de manière à constituer un électro-aimant ; et qu'enfin le fil revienne à Paris, pour se réunir au pôle négatif de la pile. Il suffira d'établir et d'interrompre successivement le courant à Paris, pour produire et supprimer aussitôt l'aimantation de l'électro-aimant situé à Rouen. Supposons de plus que l'on ait disposé, tout près des pôles de cet électro-aimant, un morceau de fer doux qui soit mobile, de manière à pouvoir se mettre en contact avec ces pôles, et qui en soit cependant écarté par un léger ressort. Au moment où l'on établira le courant électrique à Paris, ce morceau de fer sera attiré par l'aimant, et viendra se mettre en contact avec lui, en faisant céder le petit ressort qui le retient ; aussitôt qu'on interrompra le courant, l'aimantation disparaîtra, et le morceau de fer doux, n'étant plus attiré, cédera à l'action du ressort qui tend constamment à l'éloigner de l'électro-aimant. En établissant et interrompant successivement plusieurs fois de suite le courant à Paris, on donnera lieu à un mouvement de va-et-vient de la pièce de fer, qui est en présence de l'électro-aimant à Rouen, et l'on pourra se servir de ce mouvement pour produire les signes qu'on voudra. Tel est le principe de la télégraphie électrique.

Les appareils destinés à appliquer ce principe sont très-divers. Nous décrirons, comme exemple, le télégraphe à cadran, qui est assez employé. La figure 543 représente un télégraphe de ce genre disposé spécialement par M. Froment, de manière à en faciliter la démonstration. Le cadran de droite est installé dans le lieu où se trouve la pile qui fournit l'électricité ; celui de gauche est placé dans le second lieu, avec lequel on veut correspondre.

Les deux fils *a*, *b* sont en communication avec les deux pôles de la pile, le premier *a* avec le pôle positif et le second *b* avec le pôle négatif. Lorsque le courant est établi, il part du pôle positif, passe par le fil *a*, et vient se rendre dans le montant métallique *c* ; de là il traverse la roue *d*, descend par le montant *e*, et quitte le premier appareil par le fil *f*. Ce courant pénètre dans le second appareil par le fil *f'*, suit ce fil qui s'enroule autour d'un électro-aimant situé en arrière, vient passer en *g*, puis retourne en traversant la pièce *h*, et quitte le second appareil par le fil *k*. Enfin il revient en *k'* dans le premier appareil, traverse la pièce *l*, et aboutit au pôle négatif de la pile par le fil *b*.

Pour établir et interrompre successivement le courant, il suffit de faire tourner la roue *d*, en saisissant le bouton *m* que porte l'aiguille fixée à son axe. Cette roue est garnie de dents qui viennent successivement rencontrer des espèces de cames fixées aux extrémités des montants *c*, *e* ; elle ne peut tourner qu'autant que ses dents repoussent les cames, en faisant fléchir les pièces *c*, *e*. Les choses sont disposées de manière que la roue *d* touche toujours la pièce *c* par une de ses dents, quelle que soit la position qu'on lui donne ; tandis que la came de la pièce *e* se trouve entre deux dents de la roue *d*, sans toucher ni l'une ni l'autre, chaque fois que l'aiguille correspond à une des lettres que porte le cadran. Il en résulte que le courant électrique ne passe pas le long du fil, tant que l'aiguille est arrêtée sur une des lettres, puisqu'il y a solution de continuité entre la roue *d* et le montant *e*. Lorsqu'on fait tourner

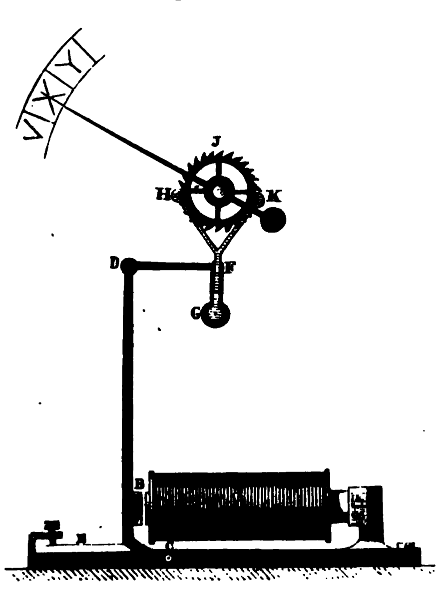


Fig. 541.


A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V X Y Z


A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V X Y Z

Fig. 543.

l'aiguille, pour l'amener d'une lettre à la suivante, de la lettre X à la lettre Y par exemple, une des dents de la roue vient toucher la came de la pièce *e*, puis l'abandonne presque aussitôt ; ce contact se produit au moment où l'aiguille correspond au trait qui sépare les deux lettres, et le courant s'établit en conséquence ; le courant est de nouveau interrompu, lorsque l'aiguille est arrivée sur la lettre Y.

Voyons maintenant comment les alternatives d'existence et d'interruption du courant électrique peuvent faire mouvoir l'aiguille du second cadran, de manière à lui donner toujours la même position qu'à la première, c'est-à-dire à la faire toujours correspondre à la même lettre. Tout près de l'électro-aimant A (fig. 544 et 545), qui est installé en arrière du cadran de gauche, se trouve une pièce de fer B, destinée à être attirée par l'aimant, chaque fois que le courant électrique est établi. Cette pièce de fer est fixée à un levier CD, mobile autour du point C. Une petite lame de ressort E, fixée au même levier CD, est pressée sur sa face supérieure par la pointe d'une vis, qui lui donne ainsi une tension suffisante pour écarter le morceau de fer B de l'électro-aimant, lorsque le courant n'existe pas ; mais la tension de ce ressort n'est pas assez forte pour s'opposer à ce que le morceau de fer B vienne toucher l'aimant, au moment où le courant existe. Les alternatives d'existence et d'interruption du courant donnent lieu ainsi à un mouvement de va-et-vient de la pièce de fer B, et par suite du levier CD ; ce mouve-

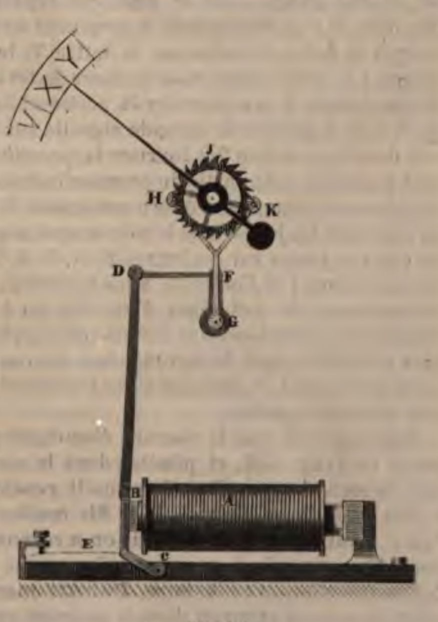


Fig. 545.

ment se transmet, par la tige DF, au levier GHK, mobile autour du point G. Ce dernier levier se divise en deux branches dont les extrémités H, K portent chacune une petite cheville, disposée de manière à pouvoir s'engager entre les dents d'une roue à rochet J, qui est fixée à l'axe de l'aiguille. Supposons que les aiguilles des deux cadrans correspondent toutes deux à la lettre X : d'après ce que nous avons dit, le courant électrique sera interrompu ; la pièce de fer B sera écartée de l'électro-aimant par l'action du ressort E (fig. 544) ; et la petite cheville K s'appuiera au fond de l'angle formé par deux dents de la roue J. Si l'on amène l'aiguille du premier cadran sur le trait qui sépare la lettre X de la le Y, lettre courant s'établira ; la pièce B sera attirée par l'électro-aimant ; la cheville H sera poussée vers la droite, et, en glissant sur la partie oblique d'une des dents de la roue J, elle la fera tourner de manière à amener également l'aiguille du second cadran sur le trait qui sépare les lettres X et Y (fig. 545). Si l'on continue le mouvement de l'aiguille du premier cadran et qu'on l'amène sur la lettre Y, le courant sera interrompu : le petit ressort E entraînera le levier CD ; et la cheville K, en glissant à son tour sur la partie oblique d'une des dents de la roue J, placera la seconde aiguille sur la même lettre Y. On voit donc que, si l'on fait tourner la première aiguille en lui faisant parcourir une partie du premier cadran, la seconde aiguille prendra exactement le même mouvement. Si la première aiguille, en tournant toujours dans le même sens, s'arrête successivement un certain temps sur les lettres P, A, R, I, S, la seconde aiguille fera de même ; et l'on aura ainsi transmis, pour ainsi dire instantanément, le mot *Paris* d'une station à l'autre. On conçoit qu'on peut remplacer les lettres de l'alphabet par des signes plus expéditifs dont la signification est convenue d'avance ; en sorte qu'on peut de cette manière transmettre des dépêches avec une extrême rapidité.

Nous avons dit que le courant électrique quitte le premier appareil en *f* (fig. 543), et pénètre dans le second en *f'* ; puis qu'il sort du second appareil en *k*, et qu'il rentre dans le premier en *k'*. On avait établi d'abord deux fils conducteurs allant, l'un de *f* en *f'*, l'autre de *k* en *k'* ; mais on a reconnu que le second fil peut être supprimé, pourvu qu'on mette les points *k*, *k'*, en communication avec la terre. De cette manière, le courant revient du second appareil dans le premier en passant par la terre qui sert de conducteur. Quant au premier fil *ff'*, il doit être isolé de la terre, afin que le courant ne prenne pas un autre chemin celui qui a été indiqué précédemment. A cet effet, on le

suspend à des poteaux plantés de distance en distance, ordinairement le long des lignes de chemins de fer, et on l'accroche à ces poteaux au moyen de matières peu conductrices, telles que du verre ou de la porcelaine.

Un fil unique, allant d'une station à une autre, suffit pour la correspondance dans les deux sens. Il existe pour cela à chaque station deux appareils comme ceux de la figure 543 : un pour envoyer les dépêches, et un autre pour les recevoir. On met alternativement le fil conducteur en communication avec l'un ou l'autre de ces appareils, suivant que les dépêches doivent se transmettre dans un sens ou dans l'autre.

§ 451. **Machine électro-motrice.** — L'attraction exercée par un électro-aimant sur un morceau de fer doux placé dans son voisinage, peut être utilisée pour faire mouvoir divers mécanismes, et vaincre en même temps les résistances qui leur sont appliquées. Pour cela, il faut d'abord qu'une machine spéciale reçoive l'action de l'électro-aimant, de même que la machine à vapeur reçoit l'action de la vapeur, pour la transmettre ensuite aux machines-outils destinées à la production du travail utile. Cette machine spéciale, qui n'a d'autre objet que de servir d'intermédiaire entre l'électro-aimant et les mécanismes qu'il doit faire mouvoir, se nomme une *machine électro-motrice.*

M. Froment, un des premiers qui se soient occupés de ce genre de machines, a imaginé diverses dispositions toutes très-ingénieuses. La machine que nous allons décrire, et qui est représentée par la figure 546, est celle qui a été construite pour la Faculté des sciences de Paris, par M. Bourbouze. Dans cette machine quatre cylindres creux A, B, dont deux sont cachés par les deux autres sur la figure, sont enveloppés par les spires nombreuses de fils métalliques recouverts de soie, qui doivent servir de passage au courant électrique. A l'intérieur de ces cylindres creux pénètrent, sans frottement, des cylindres de fer doux C, D, qui sont pleins. Les cylindres C, réunis à leur partie supérieure par une pièce transversale, également de fer doux, comme on le voit sur la figure 547, sont suspendus à l'extrémité E du balancier EFG, au moyen d'une articulation. Les cylindres D sont de même suspendus au point G. Le mouvement communiqué aux pièces C, D, par l'action de l'électricité, ainsi que nous allons l'expliquer, donne lieu à des oscillations du balancier autour du point F. Ce balancier se prolonge jusqu'en H, et est relié en ce point à une bielle HK, qui saisit en K le bouton d'une manivelle fixée à un arbre tournant. Le mouvement oscillatoire du balancier détermine ainsi la rotation de l'arbre : un volant qui

participe à cette rotation est destiné à en régulariser la vitesse.

Pour faire comprendre comment l'électricité peut mettre en mouvement les pièces C, D, examinons spécialement la figure 547. On y aperçoit les cylindres de fer C, qui pénètrent à l'intérieur des cylindres creux A, jusque près du milieu de leur hauteur.

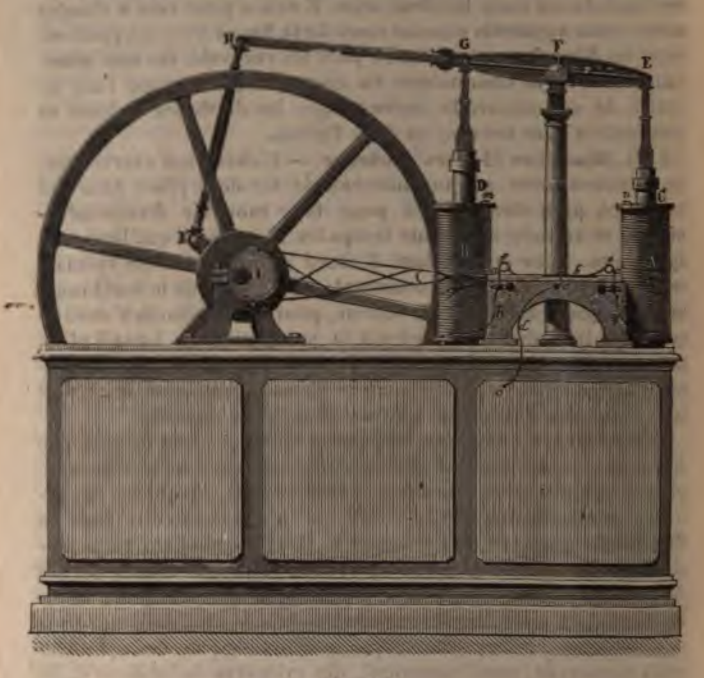


Fig. 546.

D'autres cylindres C', aussi de fer, remplissent la moitié inférieure du vide des cylindres creux A, et sont réunis l'un à l'autre par une barre de fer qui passe au-dessous d'eux. On a donc en réalité deux pièces distinctes CC, C'C', dont chacune a la forme d'un fer à cheval, et qui sont toutes deux placées de manière à pouvoir se transformer en aimants sous l'influence du courant électrique qui circule tout autour des cylindres A. Par suite de la disposition adoptée, les deux aimants ainsi obtenus ont leurs pôles de noms contraires en présence, et par conséquent ils s'at-

tirent et tendent à se mettre en contact; l'aimant C'C' étant fixe, c'est l'aimant CC qui se met en mouvement, et qui abaisse ainsi l'extrémité E du balancier. Lorsque ce mouvement est produit, le courant électrique cesse de passer autour des cylindres A; les pièces CC, C'C' repassent à l'état de fer doux, et cessent de s'attirer. Mais, en même temps, le courant vient passer autour des cylindres B; la pièce de fer D se change en aimant, et est attirée vers le bas de la même manière, ce qui détermine un abaissement du point G du balancier. Le courant électrique, après avoir produit cet effet, vient de nouveau passer autour des cylindres A, et ainsi de suite.

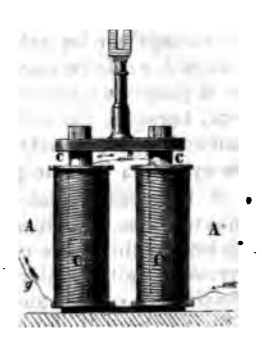


Fig. 547.

C'est la machine elle-même qui fait passer le courant électrique, tantôt autour des cylindres A, tantôt autour des cylindres B. A cet effet, l'arbre qui reçoit un mouvement de rotation porte un excentrique L (fig. 546), qui donne un mouvement de va-et-vient à une glissière *aa*. Cette glissière, formée d'une petite plaque d'ivoire, est recouverte dans une partie de sa longueur d'une lame métallique *b*. Un fil de cuivre *c* se recourbe de manière à venir s'appuyer constamment par sa pointe sur cette lame métallique, malgré le mouvement de va-et-vient qu'elle reçoit de l'excentrique; ce fil est en communication avec l'un des pôles de la pile par le fil conducteur *d*, qui pénètre en *o* dans le compartiment intérieur où elle est placée. Deux autres fils de cuivre *e*, *f*, s'appuient également par leur pointe sur la glissière *aa*, et communiquent, l'un avec le fil *g* qui vient des cylindres A, l'autre avec le fil *h* qui vient des cylindres B. Le mouvement de va-et-vient de la glissière *aa* amène la plaque *b* alternativement sous le fil *e* et sous le fil *f*; en sorte que le fil *c* est mis ainsi en communication, tantôt avec le fil *g*, tantôt avec le fil *h*, par l'intermédiaire de la plaque métallique *b*. En nous reportant maintenant à la figure 548, qui est une coupe horizontale de la partie de la machine dont

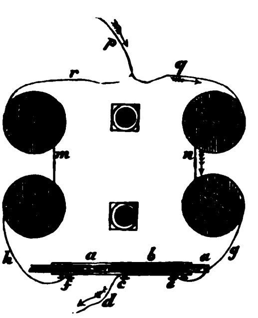


Fig. 548.

nous nous occupons, nous verrons que le courant électrique, qui vient de l'un des pôles de la pile par le fil *p*, et se rend à l'autre pôle par le fil *d*, peut suivre pour cela deux chemins différents, suivant la position qu'occupe la glissière *aa*. Dans la position qu'indique la figure pour cette pièce, le courant va de *p* en *q*; il tourne en montant autour d'un premier cylindre A; il se rend par le fil *n* sur le second cylindre A, autour duquel il tourne en descendant; il quitte ce second cylindre par le fil *g*, va de *e* en *c* par la plaque métallique *b*, et arrive enfin au fil *d*. Le passage par les cylindres B est interrompu, parce que les parties *f*, *c*, de ce passage ne sont réunies que par une portion de la plaque d'ivoire *a*, et que l'ivoire est un mauvais conducteur. Lorsque, par suite de la rotation de l'arbre, l'excentrique amène la plaque métallique *b* sous le fil *f*, l'électricité passe par les cylindres B, et ne passe plus par les cylindres A.

M. Froment emploie ses machines électro-motrices pour faire mouvoir des machines à diviser, et s'en sert notamment pour diviser les limbes de cercles destinés à la mesure des angles. Il arrive de cette manière à des résultats d'une précision extraordinaire ; et cette grande précision est due en partie à la régularité avec laquelle fonctionnent ses machines motrices. Les machines électro-motrices n'ont pas encore reçu jusqu'à présent d'application en grand dans l'industrie. La plus forte machine de ce genre que M. Froment ait construite a la force d'un cheval.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE PARTIE.

DEUXIÈME PARTIE.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

Corbeil. typ. et stér. de Crété









